



TUGAS AKHIR - TE 141599

DESAIN DAN SIMULASI KONTROL *GENERATOR SIDE CONVERTER* DAN *GRID SIDE INVERTER* TERHUBUNG JALA-JALA DENGAN KONTROL LOGIKA FUZZY UNTUK *VARIABLE SPEED WIND TURBINE*

Bayu Indra Setyanto
NRP 2213100046

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Danar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

***DESIGN AND SIMULATION CONTROL OF GENERATOR
SIDE CONVERTER AND GRID SIDE INVERTER GRID
CONNECTED WITH FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR
VARIABLE SPEED WIND TURBINE***

Bayu Indra Setyanto
NRP 2213100046

Advisors
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Danar Fahmi, S.T., M.T.

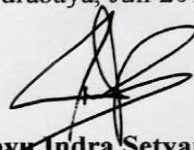
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Desain dan Simulasi Kontrol Generator Side Converter dan Grid Side Inverter Terhubung Jala-Jala Dengan Kontrol Logika Fuzzy untuk Variable Speed Wind Turbine**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017



Bayu Indra Setyanto
NRP. 2213100046

**DESAIN DAN SIMULASI KONTROL GENERATOR SIDE
CONVERTER DAN GRID SIDE INVERTER TERHUBUNG
JALA-JALA DENGAN KONTROL LOGIKA FUZZY UNTUK
VARIABLE SPEED WIND TURBINE**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198006032006041003

Daniar Fahmi, S.T., M.T.
NIP. 198909252014041002



**DESAIN DAN SIMULASI KONTROL *GENERATOR SIDE*
CONVERTER DAN *GRID SIDE INVERTER* TERHUBUNG JALA-
JALA DENGAN KONTROL LOGIKA FUZZY UNTUK
*VARIABLE SPEED WIND TURBINE***

Bayu Indra Setyanto
2213100046

Dosen Pembimbing I : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRAK

Listrik dapat dihasilkan melalui beberapa cara. Kebanyakan bahan bakar digunakan untuk memutar turbin yang terkoneksi dengan generator yang nantinya akan menghasilkan energi listrik. Tak terkecuali dengan energi angin yang menggunakan turbin angin. Turbin angin berdasarkan putarannya terdapat dua jenis yaitu *fixed speed* dan *variable speed*. Dengan kondisi wilayah yang mempunyai kecepatan angin yang berbeda-beda, turbin angin jenis *variable speed* lebih sering digunakan karena dapat mendapatkan daya maksimum yang diinginkan pada rentang kecepatan angin yang besar. Pada penggunaan turbin angin juga menggunakan peralatan elektronika daya tambahan seperti *generator side converter* dan *grid side inverter*. Maka dibutuhkan algoritma khusus agar dapat mengoptimalkan kerja dari *generator side converter* dan *grid side inverter*.

Penelusuran daya maksimum menggunakan logika fuzzy yang mengatur *duty cycle* pada konverter. Tegangan DC-Link dijaga konstan pada tegangan 650 Volt dengan regulator tegangan DC yang menggunakan kontrol logika fuzzy. Digunakan MATLAB/Simulink untuk menyimulasikan pemodelan sistem turbin angin. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa kontrol logika fuzzy dapat mengatur aliran daya pada perubahan kecepatan angin.

Kata Kunci: Turbin Angin terhubung jala-jala, MPPT, Kontrol Inverter, Kontrol Logika Fuzzy

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESIGN AND SIMULATION CONTROL OF GENERATOR SIDE
CONVERTER AND GRID SIDE INVERTER GRID CONNECTED
WITH FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR VARIABLE SPEED WIND
TURBINE**

Bayu Indra Setyanto
2213100046

Advisor I : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Advisor II : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ABSTRACT

Electricity can be generated from several ways. Fuel that used to generated electricity mostly rotate turbine that connected to generator that will be generate electrical energy, including wind energy that use wind turbine. Wind turbine based on the rotation have two types, fixed speed and variable speed. With the conditions of the region that have different wind speed, variable speed are more used because it can obtain maximum power from large wind speed range. Wind turbine also use power electronics equipment such as converter and inverter. In order to optimize the work of converter and inverter special algorithm is needed.

MPPT using fuzzy logic that controls the duty cycle in converter is used. The DC-Link voltage is kept constant at 650 Volts with DC voltage regulator that use fuzzy logic. MATLAB/Simulink is use to simulate wind turbine system. The results of the simulation show that the fuzzy logic control can regulate power flow at changes in wind speed.

Kata Kunci: Wind Turbine system grid connected, MPPT, Inverter Controller, Fuzzy Logic Controller

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Melalui kegiatan ini, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang bersifat penelitian ilmiah selama satu semester sebagai aplikasi ilmu serta persyaratan menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Buku tugas akhir ini dapat terselesaikan atas bantuan banyak pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas segala nikmat dan rahmat yang telah diberikan selama ini.
2. Bapak saya Eddy Susilo, Ibu saya Dian Nirmala, adik saya Galih Widya Setyanti dan Putri Malinda Dewi, serta seluruh keluarga besar yang telah banyak memberikan dorongan, baik moral maupun material dalam penyelesaian buku tugas akhir ini.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Daniar Fahmi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
4. Rekan-rekan asisten Laboratorium Konversi Energi angkatan 2013 dan 2014 yang selalu memberikan semangat dan doa untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Rekan-rekan e-53 yang selalu memberi semangat.
6. Laptop ASUS A450LC yang selalu berjuang dalam membantu menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis pun memohon atas segala kekurangan pada Tugas Akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	4
BAB 2 SISTEM TURBIN ANGIN TERHUBUNG JARINGAN	5
2.1 Turbin Angin	5
2.1.1 Jenis Turbin Angin	5
2.2 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG).....	8
2.3 Penyearah Tiga Fasa Tak Terkontrol.....	9
2.4 Boost Converter.....	10
2.5 Kontrol MPPT (Maximum Power Point Tracker)	13
2.6 Grid Connected VSI	15
2.6.1 Three-phase Voltage Source Inverter	15

2.6.2	Teknik Modulasi	16
2.7	Kontrol Grid Side VSI.....	17
2.8	Filter LCL	19
BAB 3 PERANCANGAN DAN PEMODELAN SISTEM TURBIN ANGIN TERHUBUNG JARINGAN		21
3.1	Sistem Variable Speed Wind Turbine dengan kontrol MPPT dan Kontrol Grid Side Inverter berbasis Fuzzy	21
3.2	Desain dan Parameter Turbin Angin	21
3.3	ParamEter Boost Converter.....	23
3.4	Pengujian Turbin Angin	24
3.5	Kontrol MPPT Logika Fuzzy	24
3.6	Grid Side Inverter.....	28
3.6.1	Rangkaian Inverter Tiga Fasa	28
3.6.2	Kontrol Inverter	28
3.7	Desain Filter LCL	33
BAB 4 HASIL SIMULASI SISTEM TURBIN ANGIN TERHUBUNG JARINGAN		35
4.1	Pengujian Sistem Turbin Angin dengan Kecepatan Angin Bervariasi.....	35
4.2	Pengujian Sistem Turbin Angin Terhubung Jaringan dengan Kecepatan Angin Bervariasi	39
BAB 5 PENUTUP		47
5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran	47
DAFTAR PUSTAKA		49
LAMPIRAN		51
BIOGRAFI PENULIS		53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 HAWT dan VAWT	6
Gambar 2.2 Karakteristik daya terhadap putaran rotor turbin	8
Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen PMSG [5]	9
Gambar 2.4 Penyearah Tiga Fasa Tak Terkontrol	10
Gambar 2. 5 Grafik tegangan input (AC 3-fasa) dan output (DC) [6] ..	10
Gambar 2.6 Boost Converter.....	11
Gambar 2.7 Konverter saat Saklar ON.....	11
Gambar 2.8 Konverter saat Saklar off.....	12
Gambar 2.9 Kurva Karakteristik Daya Terhadap Putaran Rotor.....	14
Gambar 2.10 Fuzzy Logic Controller	14
Gambar 2.11 Three Phase Voltage Source Inverter	15
Gambar 2.12 Gelombang SPWM [6].....	17
Gambar 2.13 Blok diagram kontrol inverter	18
Gambar 2.14 Blok diagram regulator tegangan DC	18
Gambar 2.15 Blok diagram regulator arus	18
Gambar 2.16 Filter LCL.....	19
Gambar 3.1 Sistem Turbin Angin Terhubung Jaringan Tiga Fasa	21
Gambar 3.2 Pemodelan Turbin Angin Pada Simulink	23
Gambar 3.3 Skema Boost Converter.....	23
Gambar 3.4 Pemodelan Diagram Blok MPPT Fuzzy Logic pada Simulink	25
Gambar 3.5 Kriteria kontrol logika fuzzy untuk MPPT turbin angin ...	25
Gambar 3.6 Membership Function untuk error	26
Gambar 3.7 Membership Function untuk delta error	26
Gambar 3.8 Membership Function untuk duty cycle	26
Gambar 3.9 Surface logika fuzzy pada MPPT turbin angin.....	27
Gambar 3.10 Skema Kontrol Inverter	29
Gambar 3.11 Skema regulator tegangan DC pada Simulink.....	30
Gambar 3.12 Membership Function untuk error	30
Gambar 3.13 Membership Function untuk delta error	31
Gambar 3.14 Membership Function untuk Id ref.....	31
Gambar 3.15 Surface kontrol inverter logika fuzzy	32
Gambar 3.16 Skema regulator arus pada Simulink	33
Gambar 4.1 Kurva Kecepatan Angin	36

Gambar 4.2 Kurva daya aktual dan daya referensi pada boost converter	36
Gambar 4.3 Tegangan Output Boost Converter.....	37
Gambar 4.4 Kecepatan rotasi rotor turbin angin pada kecepatan angin berbeda	38
Gambar 4.5 Variasi kecepatan angin	39
Gambar 4.6 Daya aktif output turbin angin	40
Gambar 4.7 Daya reaktif output turbin angin	41
Gambar 4.8 Aliran Daya Aktif	42
Gambar 4.9 Aliran Daya Aktif $t = 0,6s - 0,9s$	42
Gambar 4.10 Daya aktif dan reaktif jaringan.....	43
Gambar 4.11 Tegangan Grid	44
Gambar 4.12 Tegangan Output Inverter $t = 0,2s - 0,4s$	44
Gambar 4.13 Arus Output Inverter $t = 0,4s - 0,6s$	45
Gambar 4.14 Tegangan DC-link.....	45
Gambar 4.15 VDC-link dengan Logika Fuzzy dan Kontrol PI	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penskalaran Inverter Tiga Fasa	16
Tabel 3.1 Parameter Turbin Angin EB-WFDG20.....	21
Tabel 3.2 Parameter PMSG 20 kW	22
Tabel 3.3 Daya Referensi Turbin Angin	24
Tabel 3.4 Rule base variabel e, de dan duty cycle pada MPPT Turbin Angin	27
Tabel 3.5 Rule base variabel e, de dan Idref pada Kontrol Inverter	32
Tabel 4.1 Daya output aktual Turbin Angin dengan daya referensi pada kecepatan angin berbeda	37
Tabel 4.2 Putaran referensi dan putaran aktual turbin angin pada kecepatan angin berubah	38
Tabel 4.3 Daya output aktual Turbin Angin dengan daya referensi pada kecepatan angin berbeda saat terhubung grid.....	40

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada zaman di mana energi terbarukan sudah mulai banyak digunakan, pembangkit listrik pun juga mulai beralih ke pembangkit dengan sumber energi yang terbarukan dan lebih ramah lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang biasa digunakan pada pembangkit listrik adalah angin. Pembangkit listrik tenaga angin memiliki dua komponen utama, yaitu turbin angin yang berputar dan menyalurkan energi yang dihasilkan menuju generator yang akan dikonversikan menjadi energi listrik. Sekarang, penggunaan *variable speed* pada *permanent magnet synchronous generator (PMSG)* menjadi hal yang populer digunakan pada penggunaan energi angin [1]. Pada Pembangkit Tenaga Angin, energi yang dihasilkan dari angin yang dikonversikan menjadi energi listrik tidak hanya bergantung pada angin yang berada pada tempat tersebut tetapi dapat juga dipengaruhi oleh strategi kontrol yang digunakan [2]. Untuk itu digunakan *variable speed wind turbine (VSWT)-PMSG* ketika dikoneksikan pada jala-jala dibutuhkan sebuah frekuensi konverter kontrol penuh. Sementara itu digunakan pula sistem inverter yang akan mempengaruhi stabilitas VSWT-PMSG. Ada dua jenis WTG yaitu *fixed speed* dan *variable speed*. Tetapi *fixed speed* sudah tidak digunakan pada instalasi baru karena tidak dapat menangkap daya maksimum dari angin. *Variable speed* menyediakan lebih banyak daya daripada *fixed speed*.

Pada *variable speed wind turbine* dapat berputar pada kecepatan yang bervariasi dan memiliki rentang nilai kecepatan angin yang besar dan setiap kecepatan angin rotor memiliki kecepatan saat daya maksimum. Serta dibutuhkan sebuah algoritma khusus untuk mengatur efisiensi maksimum. Pada *grid side inverter* juga diperlukan algoritma agar dapat bekerja secara efisien pada kondisi normal maupun saat ada gangguan serta dapat mengatur daya reaktif yang diterima pada sisi jala-jala [1].

Oleh karena itu pada penelitian ini akan dikaji mengenai strategi kontrol pada *generator side converter* dan *grid-side inverter* menggunakan *Fuzzy Logic Controller* yang dapat menghasilkan daya aktif yang optimal dan dapat mengontrol tegangan DC-link dengan nilai konstan pada *variable speed wind turbine* dengan nilai kecepatan angin yang berubah-ubah.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Sistem kontrol pada sistem *variable speed wind turbine* yang terhubung jala-jala.
2. Kontrol logika fuzzy untuk konverter dan inverter pada *variable speed wind turbine*.
3. Operasi sistem pada perubahan kecepatan angin terhadap daya aktif dan daya reaktif yang dibangkitkan menuju jala-jala.

1.3 Tujuan

Tujuan penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui sistem kontrol pada *variable speed wind turbine* yang terhubung jala-jala.
2. Mendesain dan menyimulasikan kontrol logika fuzzy untuk konverter dan inverter pada *variable speed wind turbine*.
3. Mengetahui operasi sistem pada perubahan kecepatan angin terhadap daya aktif dan daya reaktif yang dibangkitkan menuju jala-jala.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada Tugas Akhir ini sebagai berikut :

1. Pemodelan, simulasi dan analisis menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink R2015a.
2. Karakteristik pengujian *Wind Turbine* dibatasi berdasarkan variasi kecepatan angin yaitu 8 m/s, 9 m/s dan 10 m/s.
3. Daya yang dibangkitkan sistem turbin angin adalah daya aktif
4. Jaringan listrik yang digunakan adalah grid 1 MVA.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Tahap ini merupakan langkah awal dalam pengerjaan Tugas Akhir. Pada studi literatur penulis mempelajari hal-hal yang menunjang topik Tugas Akhir ini, seperti turbin angin, MPPT, kontrol strategi, VSI, *fuzzy logic controller*. Digunakan referensi dari jurnal, konferensi serta buku-buku yang menunjang hal tersebut.

2. Pemodelan dan Simulasi Sistem

Pada tahap ini dilakukan pemodelan sistem menggunakan Simulink MATLAB. Pemodelan sistem dibagi menjadi beberapa tahap sebagai berikut:

a. Pemodelan Turbin Angin

Menentukan parameter dari turbin angin yang digunakan pada Tugas Akhir.

b. Pemodelan *Generator Side Converter* dan *Grid Side Inverter*

Penentuan skema kontrol untuk mengatur *Generator Side Converter* serta *Voltage Source Inverter*, yang ditentukan pula oleh kontrol logika fuzzy yang digunakan.

c. Pemodelan Kontrol Strategi menggunakan *Fuzzy Logic Controller*

Dilakukan pemodelan logika fuzzy dengan jenis *membership function triangular* untuk sinyal masukan dan keluarannya. Serta digunakan *rule-base IF-THEN* dan *inference* dengan metode Mamdani.

d. Pemodelan sistem secara keseluruhan

Pada pemodelan dan simulasi sistem secara keseluruhan akan didapatkan daya aktif dan daya reaktif pada sisi jala-jala pada kondisi yang diinginkan.

3. Evaluasi Pemodelan dan Simulasi Sistem

Pada tahap ini, dilakukan evaluasi dari pemodelan dan simulasi sistem yang telah dilakukan. Evaluasi dilakukan per-pemodelan dan secara keseluruhan. Dengan dilakukannya evaluasi, dapat diketahui keluaran yang dihasilkan sudah benar atau ada kesalahan dan perlu dilakukan koreksi. Apabila terdapat kesalahan, maka dilakukan pembuatan ulang pemodelan dan simulasi. Apabila pemodelan yang dilakukan telah mencapai parameter yang diinginkan maka dapat diteruskan dengan tahap analisa data.

4. Analisa Data

Pada tahap ini dilakukan analisa data secara keseluruhan sehingga didapatkan hasil keluaran yang diinginkan. Hal yang di analisa antara lain, daya aktif dan daya reaktif pada sisi jala-jala baik pada kondisi. Hasil yang didapatkan akan dibandingkan ketika menggunakan inverter tidak terkontrol.

5. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Penyusunan buku tugas akhir ini merupakan tahap akhir dari penelitian ini. Yang merupakan laporan ilmiah yang berisi seluruh kegiatan yang

telah dilakukan. Mulai dari tahap studi literatur hingga analisa data yang didapatkan dari simulasi sistem.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab akan terurai sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisikan penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi tugas akhir ini.

BAB 2 Sistem Turbin Angin Terhubung Jala-Jala

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang jenis-jenis turbin angin, PMSG, penyearah tiga fasa tak terkontrol, konverter boost, kontrol MPPT logika Fuzzy, inverter tiga fasa, kontrol inverter dan filter LCL.

BAB 3 Pemodelan Sistem Turbin Angin

Bab ini membahas mengenai pemodelan sistem yang terdiri dari sistem turbin angin, parameter konverter, kontrol MPPT logika Fuzzy, kontrol inverter serta desain filter LCL

BAB 4 Hasil Simulasi dan Analisis

Bab ini berisikan hasil simulasi dan analisis dari hasil simulasi yang dilakukan.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisikan kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.7 Relevansi

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi sebuah referensi yang dapat menunjang instansi-instansi yang bergerak di bidang energi baru terbarukan khususnya turbin angin.
2. Menjadi sebuah referensi untuk mahasiswa yang akan mengerjakan penelitian dengan topik energi terbarukan khususnya mengenai turbin angin.

BAB 2

SISTEM TURBIN ANGIN TERHUBUNG JARINGAN

2.1 Turbin Angin

Listrik dapat dihasilkan melalui beberapa cara. Kebanyakan bahan bakar digunakan untuk memutar turbin yang terkoneksi dengan generator. Turbin di desain untuk memenuhi karakteristik dari tiap bahan bakar yang digunakan. Begitu juga dengan energi angin, angin digunakan sebagai bahan bakar yang memutar turbin yang terkoneksi ke generator yang menghasilkan listrik. Prinsip dasar dari turbin angin adalah mendapatkan energi dengan cara mengubah gerakan linier dari angin menjadi energi rotasi [3]. Energi rotasi yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan generator. Persamaan matematis dari energi mekanik yang dihasilkan oleh angin adalah sebagai berikut:

$$P_w = 0.5\rho\pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.1)$$

Di mana P_w adalah daya yang dihasilkan oleh angin, ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3), R adalah jari-jari sudu turbin angin (m), V_w adalah kecepatan angin (m/s), dan C_p adalah koefisien daya dari kedua fungsi rasio kecepatan, λ dan sudut pengaturan sudu, β [1].

2.1.1 Jenis Turbin Angin

2.1.1.1 HAWT dan VAWT

a) Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

VAWT berputar tegak lurus dengan permukaan tanah. VAWT biasa digunakan pada kebutuhan yang kecil. Turbin angin terpasang secara vertikal dengan posisi generator berada di dasar. Terdapat kelebihan dan kekurangan VAWT diantaranya:

Kelebihan:

- Mempunyai biaya instalasi yang lebih rendah dibandingkan dengan HAWT karena tidak harus dipasang pada tower.
- Generator dapat dipasang dipermukaan tanah, sehingga mempermudah pemeliharaan.
- Operasinya tidak bergantung pada arah angin, Karena dapat menghasilkan daya dari arah angin 360°.

Kekurangan:

- Memiliki efisiensi yang rendah karena hanya memiliki satu blade rotor.
- Terdapat batas kecepatan putaran saat kondisi angin kencang.
- Tidak dapat *self-starting*.
- Mempunyai vibrasi yang relatif tinggi.

b) *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT)

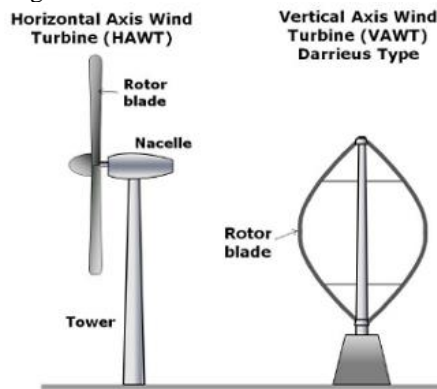
HAWT berputar pada sumbu yang sejajar dengan permukaan bumi. Turbin angin terpasang horizontal dengan posisi generator berada satu poros dengan turbin dan berada di atas. Biasa digunakan untuk membangkitkan daya yang besar. Terdapat kelebihan dan kekurangan pada HAWT diantaranya:

Kelebihan:

- Efisiensi konversi energi angin tinggi.
- Mampu *self-starting*.
- Dapat mengakses kecepatan angin yang kencang sesuai dengan ketinggian tower.

Kekurangan:

- Memiliki biaya instalasi lebih mahal daripada VAWT
- Membutuhkan tower yang kuat yang dapat menanggung turbin dan generator yang digunakan.
- Membutuhkan biaya pemeliharaan yang lebih besar karena turbin dan generator berada di atas.



Gambar 2.1 HAWT dan VAWT

2.1.1.2 Fixed dan Variable Speed Wind Turbine

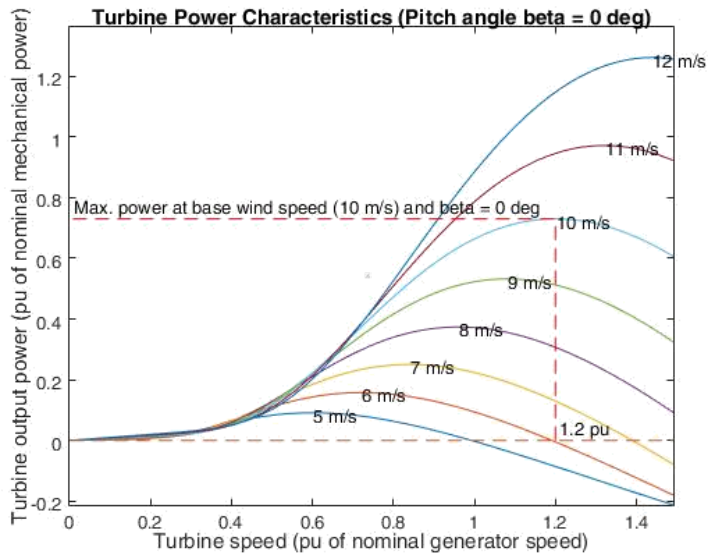
Berdasarkan putaran rotornya turbin angin dibagi menjadi dua yaitu:

a) *Fixed Speed Wind Turbine*

Kecepatan rotor turbin angin *fixed speed* berputar pada putaran yang tetap yang bergantung pada kecepatan angin. Efisiensi konversi daya maksimum hanya bisa didapat pada satu nilai tertentu di setiap kecepatan angin. Sedangkan pada titik nilai operasi yang lain daya akan turun tidak pada titik maksimumnya. Pada tipe ini, sistem turbin angin menggunakan mesin asinkron sebagai generatornya. Generator pada sistem *fixed speed*, statornya langsung terhubung dengan grid. Generator yang sering digunakan adalah *Squirrel Cage Induction Generator* (SCIG). Keuntungan dari sistem *fixed speed* adalah praktis secara mekanik, stabil dan efisiensi tinggi serta murah sebab tidak butuh konverter daya untuk teknik pengaturannya. Sedangkan kekurangannya adalah fluktuasi daya keluaran yang tinggi ke grid yang menyebabkan distorbansi pada sistem kelistrikan.

b) *Variable Speed Wind Turbine*

Variable Speed Wind Turbine digunakan karena turbin ini dapat berputar pada kecepatan angin yang bervariasi dan menghasilkan energi walaupun kecepatan angin dibawah kecepatan ratingnya. Penggunaannya dapat mengurangi tekanan fluktuasi dan mengurangi *stress* mekanik. Pada sistem ini dibutuhkan konverter yang menghubungkan antara generator sinkron dengan jala-jala, serta dibutuhkan algoritma untuk mengatur efisiensi daya yang dihasilkan. Operasi Variable Speed Wind Turbine dengan Generator Sinkron dapat menggunakan *gearbox* maupun tidak [4]. Turbin angin memiliki kurva karakteristik daya terhadap putaran rotor turbin. Hubungan antara daya dan kecepatan angin penting untuk menentukan algoritma yang digunakan agar turbin angin menghasilkan daya maksimum. Untuk mendapatkan daya maksimum dari turbin angin dapat dengan mengatur kecepatan rotor turbin angin.

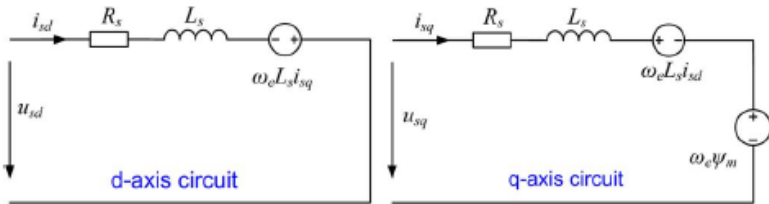


Gambar 2.2 Karakteristik daya terhadap putaran rotor turbin

2.2 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Pada sistem pembangkit listrik dengan turbin angin *variable speed* dapat digunakan beberapa macam generator untuk mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik seperti *Squirrel Cage Induction Generator* (SCIG), *Wound Rotor Induction Generator* (WRIG), *Double Fed Induction Generator* (DFIG). Serta *Synchronous Generator* baik dengan medan magnet terpisah maupun permanen magnet (PMSG). Pada skala kecil penggunaan sistem turbin angin dengan PMSG lebih sering digunakan karena memiliki efisiensi yang tinggi dan tidak memerlukan adanya *gearbox* [4].

PMSG adalah sebuah generator sinkron yang menggunakan magnet permanen sebagai sumber eksitasinya. PMSG akan mengubah daya mekanik dari turbin angin menjadi daya listrik.



Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen PMSG [5]

Gambar 2.3 merupakan rangkaian ekivalen dari PMSG. Persamaan matematis dari rangkaian ekivalen PMSG adalah

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{d}{dt} I_{sd} - L_s \omega_e I_{sq} \quad (2.2)$$

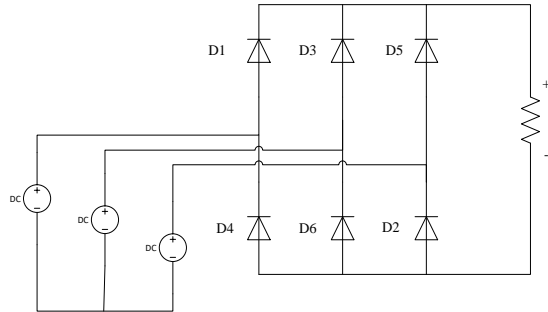
$$V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + L_s \omega_e I_{sd} + \omega_e \psi_m \quad (2.3)$$

Dimana i_{sd} dan i_{sq} merupakan arus stator pada d -axis dan q -axis, R_s dan L_s merupakan resistansi dan induktansi dari belitan stator PMSG, ω_e merupakan frekuensi angular dari arus stator dan ψ_m adalah fluks rotor [5].

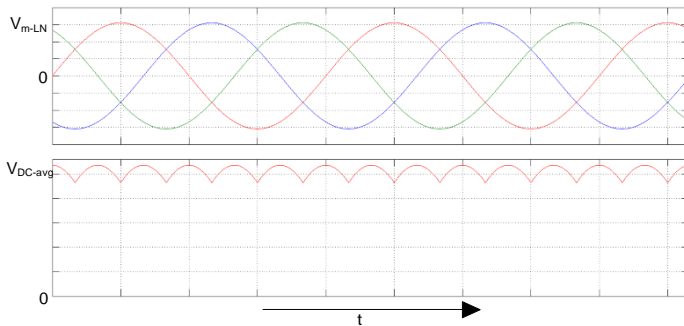
2.3 Penyearah Tiga Fasa Tak Terkontrol

Penyearah digunakan untuk mengubah tegangan AC yang dihasilkan oleh PMSG menjadi tegangan DC yang akan menjadi tegangan *input* dari konverter daya yang digunakan. Pada penelitian ini digunakan penyearah dengan dioda sehingga disebut penyearah tak terkontrol. Penyearah tiga fasa tak terkontrol terdiri dari enam buah dioda.

Dioda bagian atas (D1,D3,D5) dan Dioda bagian bawah (D4, D6, D2). Dioda yang terhubung dengan fasa yang sama tidak akan konduksi secara bersamaan. Tegangan output yang mengalir pada beban ada tegangan line-to-line dari sumber. Terdapat enam kombinasi tegangan line-to-line. Tegangan DC yang dihasilkan memiliki enam pulsa yang dihasilkan dari masing masing kombinasi tersebut tersebut [6].



Gambar 2.4 Penyearah Tiga Fasa Tak Terkontrol



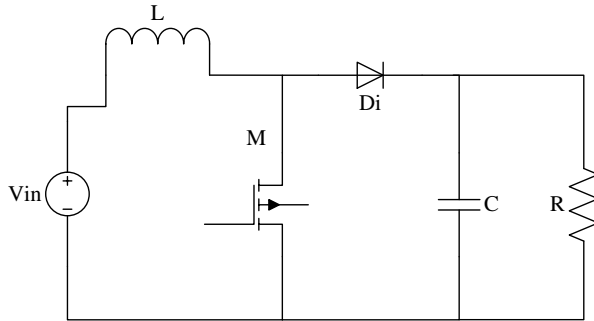
Gambar 2.5 Grafik tegangan input (AC 3-fasa) dan output (DC) [6]

Gambar 2.5 menunjukkan tegangan tiga fasa dan hasil kombinasi dari tegangan line-to-line. Persamaan gelombang tegangan keluaran rata-rata (V_{dc}) adalah:

$$V_{o-avg} = \frac{3V_{m-LL}}{\pi} \quad (2.4)$$

2.4 Boost Converter

Pada sistem turbin angin tegangan yang dihasilkan tidak cukup besar untuk langsung dihubungkan dengan jaringan tiga fasa sehingga dibutuhkan sebuah konverter DC-DC untuk menaikkan tegangan. Maka dari itu digunakan Konverter *Boost* untuk menaikkan tegangan penyearah sebelum akhirnya terhubung dengan jaringan tiga fasa.



Gambar 2.6 *Boost Converter*

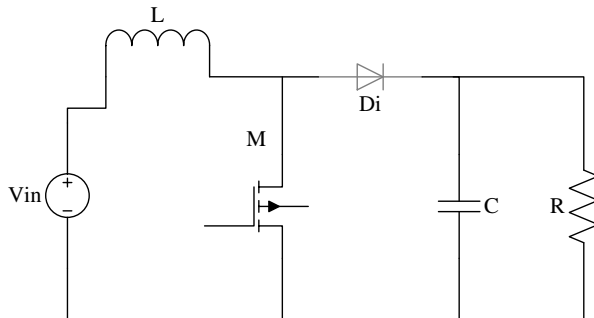
Rangkaian konverter terdiri dari satu buah MOSFET, satu buah dioda, satu buah kapasitor dan satu buah induktor. Konverter ini memiliki rasio konversi tegangan sebagai berikut:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2.5)$$

Dimana V_o adalah tegangan keluaran, V_{in} adalah tegangan masukan dan D adalah *duty cycle*. Berikut adalah analisa rangkain konverter saat kondisi saklar Mosfet on dan off

- Saat Saklar on

Ketika saklar M on, maka Di dalam kondisi off.



Gambar 2.7 Konverter saat Saklar ON

Berikut adalah persamaan konverter ketika saklar M on:

Energi dari input disalurkan ke induktor L

$$V_{in} = V_L \quad (2.6)$$

$$V_{in} = L \frac{\Delta I_L}{DT_s} \quad (2.7)$$

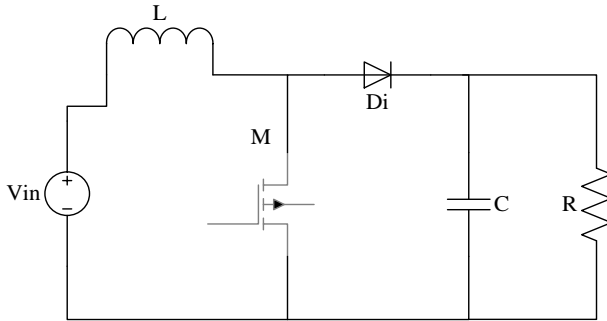
$$\Delta I_L = \frac{V_{in}DT_s}{L} \quad (2.8)$$

Energi dari kapasitor C_2 disalurkan ke beban R

$$V_C = V_o \quad (2.9)$$

- Saat Saklar off

Ketika saklar M off maka, dioda Di dalam kondisi on.



Gambar 2.8 Konverter saat Saklar off

Hubungan tegangan kapasitor C dengan tegangan input

$$-V_{in} - V_L + V_C = 0 \quad (2.10)$$

$$V_C = V_{in} + V_L \quad (2.11)$$

$$V_C = V_{in} + L \frac{\Delta I_L}{(1-D)T_s} \quad (2.12)$$

Substitusi ΔI_L dari persamaan (2.8)

$$V_C = V_{in} + L \frac{\frac{V_{in}DT_s}{L}}{(1-D)T_s} \quad (2.13)$$

$$V_C = V_{in} \left(\frac{1}{1-D} \right) \quad (2.14)$$

Substitusi V_C dari persamaan (2.9)

$$V_o = V_{in} \left(\frac{1}{1-D} \right) \quad (2.15)$$

- Parameter komponen konverter

a) Induktor L

P_o adalah daya keluaran, sementara P_{C2} adalah daya pada kapasitor C_2 , R adalah besar hambatan.

$$P_o = P_c \quad (2.16)$$

$$\frac{V_o^2}{R} = V_c I_L \quad (2.17)$$

$$\frac{(V_o)^2}{(1-D)^2 R} = V_o I_L \quad (2.18)$$

$$I_L = \frac{V_o}{(1-D)R} \quad (2.19)$$

$$I_{Lmin} = I_L \times \Delta I_L \quad (2.20)$$

Substitusikan dengan persamaan (2.7)

$$L = \frac{V_{in} D T s}{\Delta I_L} \quad (2.21)$$

b) Kapasitor C_1

$$\Delta Q_c = C \Delta V_c \quad (2.22)$$

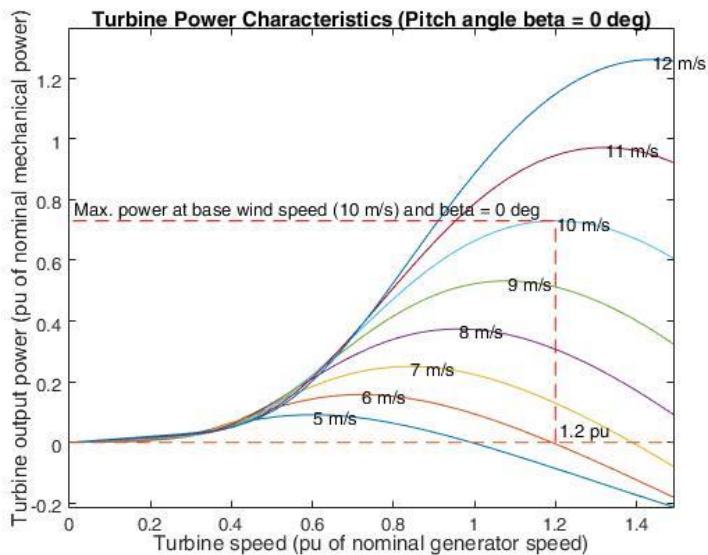
$$I_L \cdot D T s = C \Delta V_c \quad (2.23)$$

$$C = \frac{I_L}{\Delta V_c} D T s \quad (2.24)$$

2.5 Kontrol MPPT (Maximum Power Point Tracker)

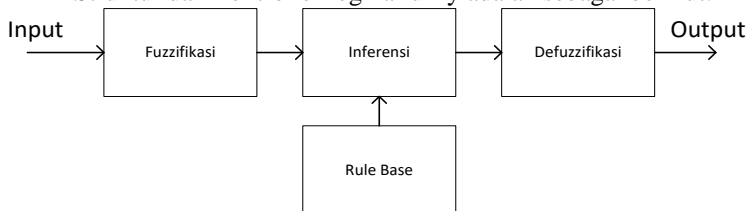
Penelusuran daya maksimum merupakan upaya yang digunakan untuk menjaga agar daya keluaran dari turbin angin bekerja pada titik kerja daya maksimal. Turbin angin memiliki karakteristik daya terhadap kecepatan rotor. Pada kecepatan angin tertentu hanya ada satu kecepatan rotor yang dapat menghasilkan daya maksimal. Kurva karakteristik turbin angin dapat dilihat pada Gambar 2.9. Untuk mempertahankan sistem turbin angin agar tetap menghasilkan daya yang maksimal, maka dilakukan kontrol MPPT dengan berbagai metode.

Pada penelitian ini digunakan metode *Fuzzy Logic Controller*. Kontrol ini memiliki kelebihan diantaranya tidak memerlukan parameter pada sistem maupun persamaan matematis. Logika fuzzy merupakan metode yang digunakan dengan memasukkan sebuah *input* ke *output* dengan menggunakan persamaan implikasi. Persamaan implikasi tersebut merupakan *rule base* dari *input* dan *output*. Pada *input* dan *output* logika fuzzy terdapat fungsi keanggotaan (*membership function*).



Gambar 2.9 Kurva Karakteristik Daya Terhadap Putaran Rotor

Struktur dari controller logika fuzzy adalah sebagai berikut:



Gambar 2.10 Fuzzy Logic Controller

a. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses pembentukan *crisp* yang menunjukkan derajat di mana nilai tersebut menjadi anggota dari himpunan fuzzy yang sesuai. Dilakukan dengan cara mengubah nilai masukan (input) yang kebenarannya bersifat pasti kedalam *membership function*.

b. Rule Base

Pada kecerdasan buatan ada beberapa cara untuk merepresentasikan pengetahuan. Salah satunya adalah IF-THEN *rule based*. Pada dasarnya

mengekspresikan inferensi jika diketahui sebuah fakta (premis, hipotesa) maka dapat didapatkan kesimpulannya.

c. Inferensi

Dengan *rule base* yang telah ditentukan, maka dilakukan proses penalaran *input fuzzy* sehingga didapatkan nilai *output fuzzy*.

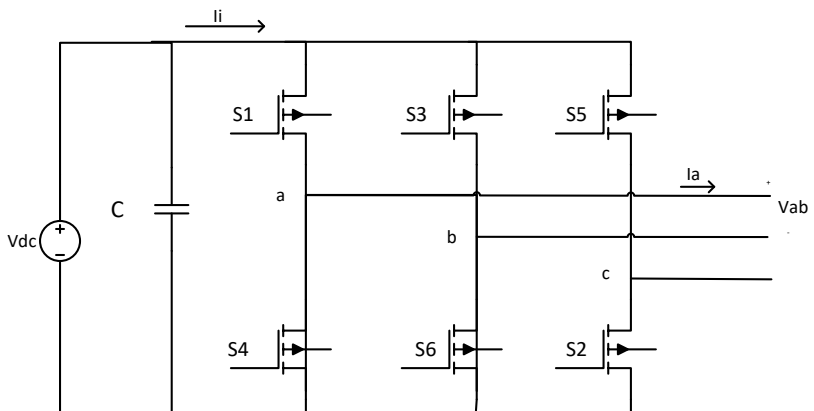
d. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses kebalikan dari fuzzifikasi. Dilakukan pengubahan nilai *output fuzzy* hasil dari inferensi *rule base* menjadi nilai kebenaran pasti [7].

2.6 Grid Connected VSI

2.6.1 Three-phase Voltage Source Inverter

Inverter merupakan peralatan elektronik yang dapat mengubah listrik DC menjadi AC. Yang terdiri dari sumber DC, *switching device* dan filter. Berdasarkan sumber DC, inverter dibagi menjadi dua yaitu *current source inverter* dan *voltage source inverter*. Ketika *voltage source inverter* digunakan, maka tegangan pada *dc link* harus lebih besar dari pada tegangan *line to line* yang disearahkan oleh rectifier. Untuk itu dapat digunakan *boost converter* dengan kontrol aliran daya agar tegangan pada *dc link* konstan. *Switching device* yang digunakan dapat berupa MOSFET, IGBT maupun komponen semikonduktor terkontrol lainnya. *Switch* tersebut di atur *on* dan *off*-nya.



Gambar 2.11 *Three Phase Voltage Source Inverter*

Gambar 2.11 merupakan topologi standar dari VSI tiga fasa. Di mana terdapat sumber DC sebagai masukan inverter, 6 *switching device*, serta tegangan AC sebagai keluaran.

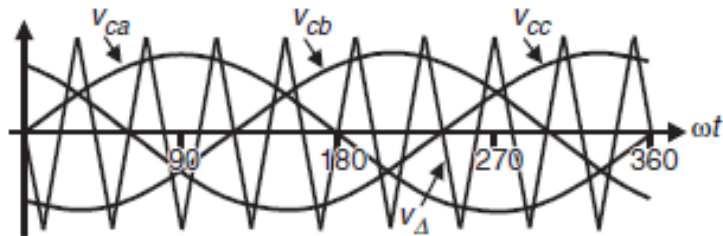
Tabel 2.1 Penskalaran Inverter Tiga Fasa

No.	Kondisi	Vab	Vbc	Vca
1	S1, S2, S6 on S4, S5, S3 off	V_i	0	$-V_i$
2	S2, S3, S1 on S5, S6, S4 off	0	V_i	$-V_i$
3	S3, S4, S2 on S6, S1, S5 off	$-V_i$	V_i	0
4	S4, S5, S3 on S1, S2, S6 off	$-V_i$	0	V_i
5	S5, S6, S4 on S2, S3, S1 off	0	$-V_i$	V_i
6	S6, S1, S5 on S3, S4, S2 off	V_i	$-V_i$	0
7	S1, S3, S5 on S4, S6, S2 off	0	0	0
8	S4, S6, S2 on S1, S3, S5 off	0	0	0

Tabel 2.1 menunjukkan delapan kondisi operasi dari inverter. Saklar yang terdapat pada fasa yang sama *on* dan *off* secara bersamaan seperti S1 dan S4 tidak dapat *on* bersama karena dapat menyebabkan hubung singkat. Pada delapan kondisi, terdapat dua kondisi yang menghasilkan tegangan AC 0 V, sedangkan enam kondisi lainnya tidak. Tegangan AC yang dihasilkan oleh inverter adalah v_i , 0, dan $-v_i$. Untuk mendapatkan gelombang tegangan AC yang diinginkan maka digunakan teknik modulasi untuk melakukan pemilihan kondisi pada inverter [8].

2.6.2 Teknik Modulasi

Pada penyaklaran inverter terdapat beberapa jenis teknik modulasi yang digunakan. Pada penelitian kali ini digunakan teknik modulasi *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM). SPWM memanfaatkan sinyal sinusoidal dari tegangan referensi serta tegangan sinyal segitiga.

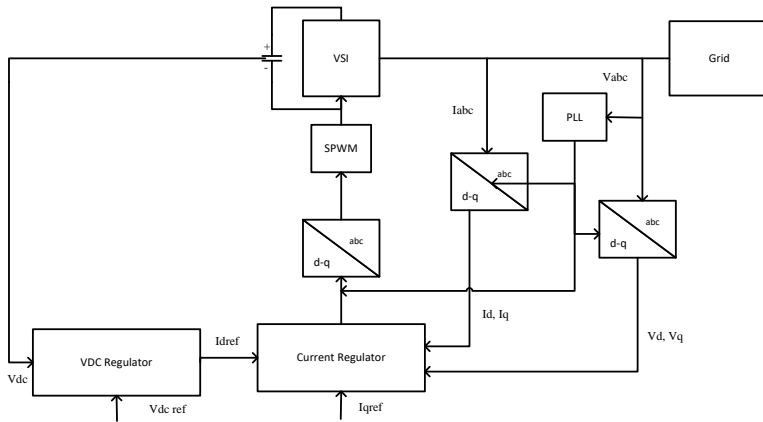


Gambar 2.12 Gelombang SPWM [6]

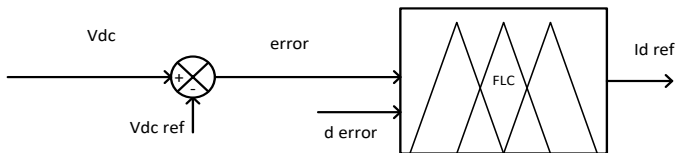
Inverter yang terhubung dengan jaringan memerlukan kontrol yang digunakan untuk mengatur teknik modulasi SPWM. Sehingga amplitudo, frekuensi dan fasa dari jaringan listrik dan inverter sama [8].

2.7 Kontrol Grid Side VSI

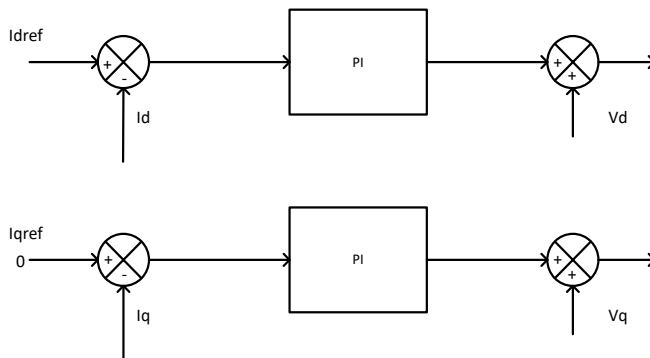
Inverter yang dihubungkan pada jaringan listrik perlu adanya kontrol inverter dengan tujuan menyalurkan daya dari sumber ke jaringan. Pada penelitian ini digunakan *current control* untuk mengatur aliran daya pada inverter. Setiap kali arus dan tegangan pada jaringan di ukur sebagai vektor tegangan referensi. Digunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) untuk membandingkan tegangan pada DC link dengan tegangan referensi dan daya aktif pada inverter. Pada inverter tiga fasa, tegangan DC link dapat dijaga agar tetap konstan pada nilai tertentu dengan cara mengatur arus aktif (I_d) yang disalurkan pada grid. Ketika tegangan DC link memiliki nilai lebih rendah dari nilai referensinya, maka arus aktif inverter yang mengalir ke jaringan akan dikurangi, sehingga arus akan mengalir ke DC link. Sementara arus reaktif (I_q) di atur pada nilai nol untuk mempertahankan faktor daya pada kondisi *unity*. Sementara untuk *current regulator* digunakan kontrol PI yang akan membandingkan arus komverter pada referensi *d-q frame* dan vektor tegangan pada *d-q frame*. Keluaran dari *current regulator* berupa nilai tegangan referensi pada *d-q frame* (V_{dref} dan V_{qref}). Yang akan masuk pada modulator PWM untuk memberikan sinyal pada inverter [9].



Gambar 2.13 Blok diagram kontrol inverter



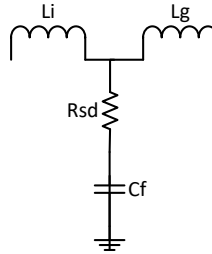
Gambar 2.14 Blok diagram regulator tegangan DC



Gambar 2.15 Blok diagram regulator arus

2.8 Filter LCL

Filter digunakan pada sisi keluaran inverter agar tegangan dan arus yang dihasilkan oleh inverter sesuai dengan nilai fundamental frekuensinya yaitu 50 Hz. Pada sistem interkoneksi dengan jaringan terdapat macam-macam filter yang dapat digunakan. Pada penelitian ini digunakan jenis filter LCL.



Gambar 2.16 Filter LCL

Filter LCL memiliki *ripple* arus yang baik meskipun dengan nilai induktansi yang kecil. Akan tetapi filter LCL rentan terhadap osilasi, sehingga perlu ditambahkan resistor peredam (*damping resistor*). Resistor ini dapat dipasang seri atau paralel pada filter induktor maupun filter kapasitor. Filter ini terdiri dari dua induktor yang dipasang seri dengan *line* serta kapasitor yang terhubung wye dengan jaringan tiga fasa serta resistor peredam yang dipasang seri dengan kapasitor. Berikut adalah persamaan desain filter LCL [10]:

$$Z_{base} = \frac{v_n^2}{P} \quad (2.25)$$

V_n merupakan tegangan *line-line* RMS inverter dan P adalah daya dari inverter.

$$L_i = \frac{V_{dc}}{16f_s \Delta I_{max}} \quad (2.26)$$

L_i merupakan nilai filter induktor inverter, V_{dc} merupakan nilai tegangan dari DC-Link, f_s adalah frekuensi SPWM pada inverter dan ΔI_{max} adalah riak arus maksimal, dengan ΔI_{max} saat *ripple* arus 10%

$$\Delta I_{max} = 0.1 \frac{P\sqrt{2}}{V_n} \quad (2.27)$$

Untuk nilai L_g didapatkan:

$$L_g = r_x L_i \quad (2.28)$$

Untuk nilai kapasitor perlu diperhatikan bahwa kondisi variasi faktor daya maksimal adalah ditentukan sebesar 5%. Sehingga nilai kapasitor adalah

$$C_f = 0,05 \frac{1}{2\pi f_N Z_{base}} \quad (2.29)$$

C_f merupakan nilai kapasitor filter, f_N adalah frekuensi dari jaringan tiga fasa. Z_{base} adalah nilai dasar impedansi yang dihitung.

Untuk mengurangi osilasi pada filter maka dibutuhkan resistor peredam yang dipasang seri terhadap kapasitor. Persamaan resistor peredam

$$R_{sd} = \frac{1}{3 \times 2\pi f_{res} C_f} \quad (2.30)$$

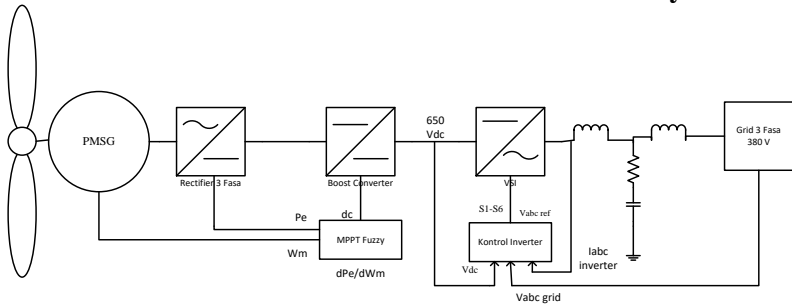
Dengan nilai f_{res}

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i \times L_g \times C_f}} \quad (2.31)$$

BAB 3

PERANCANGAN DAN PEMODELAN SISTEM TURBIN ANGIN TERHUBUNG JARINGAN

3.1 Sistem *Variable Speed Wind Turbine* dengan kontrol MPPT dan Kontrol Grid Side Inverter berbasis Fuzzy



Gambar 3.1 Sistem Turbin Angin Terhubung Jaringan Tiga Fasa

Sistem turbin angin yang digunakan pada penelitian terdiri dari *variable speed wind turbine*, PMSG, penyearah tiga fasa tak terkontrol yang keluarannya dihubungkan dengan *boost converter*. Sistem yang digunakan adalah *direct driven* dimana ketika turbin angin dihubungkan dengan PMSG tidak diperlukan *gearbox*. Skema dari sistem turbin angin dapat dilihat pada Gambar 3.1

3.2 Desain dan Parameter Turbin Angin

Tabel 3.1 Parameter Turbin Angin EB-WFDG20

Parameter	Nilai
Daya	20 kW
Daya maksimum	25 kW
Kecepatan angin <i>Cut-In</i>	4 m/ s
Kecepatan angin <i>Rated</i>	10 m/ s
Kecepatan angin <i>Cut-Out</i>	13 m/ s

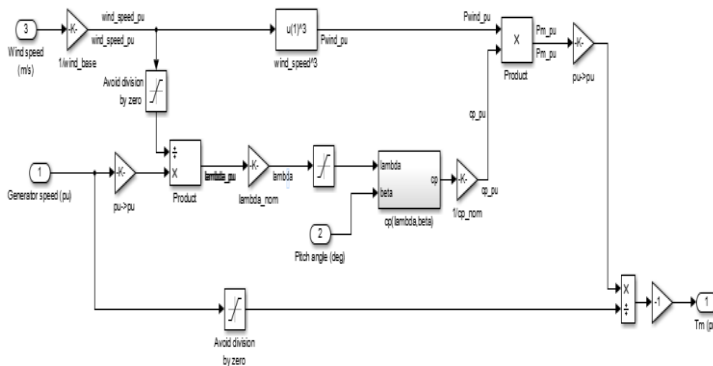
Kecepatan angin maksimum	45 m/ s
Parameter	Nilai
<i>Blade Pitch Control</i>	<i>None, Fixed Pitch</i>
Kecepatan rotor	180 rpm
Jumlah <i>blade</i>	3

Digunakan turbin angin merek EB-WFDG20 yang memiliki rating daya sebesar 20 kW pada kecepatan angin 10 m/s. Turbin angin ini dihubungkan dengan PMSG yang memiliki rating daya 20 kW.

Tabel 3.2 Parameter PMSG 20 kW

Parameter	Nilai
<i>Daya Rated</i>	20 kW
Kecepatan mekanis <i>rated</i>	211 rpm
Jumlah kutub	36
Tipe rotor	<i>Salient-pole</i>
Resistansi stator (R_s)	0,1764 ohm
Induktansi <i>leakage</i> (L_s)	4.48 mH
V_{LN} constant	1.4 V/rpm

Pemodelan turbin angin pada MATLAB/Simulink dapat dilihat pada Gambar 3.2



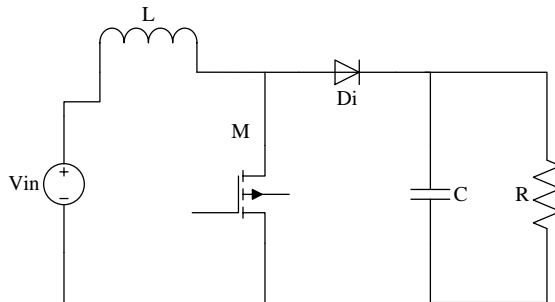
Gambar 3.2 Pemodelan Turbin Angin Pada Simulink

3.3 ParamEter Boost Converter

Boost Converter merupakan konverter DC-DC yang memiliki fungsi untuk menaikkan tegangan input ke output.

Perlu diperhatikan kemampuan untuk MPPT saat menentukan parameter dari *boost converter*. Berikut adalah parameter yang telah ditentukan untuk menghitung nilai dari komponen konverter.

- Tegangan turbin angin 100V - 290V
- Tegangan DC-link 650 V
- Ripple arus $\pm 1\%$
- Ripple tegangan $\pm 0,1\%$
- Frekuensi pensaklaran 50 kHz



Gambar 3.3 Skema *Boost Converter*

Menghitung nilai induktor L berdasar persamaan (2.21):

$$L = \frac{V_{in} D T_s}{\Delta I_L}$$

Maka didapatkan nilai induktor L sebesar 4,912 mH.

Menghitung nilai kapasitor C berdasar persamaan (2.24):

$$C = \frac{I_L}{\Delta V_c} D T_s$$

Maka didapatkan nilai kapasitor C_1 sebesar 1,114 mF

3.4 Pengujian Turbin Angin

Turbin angin dihubungkan dengan PMSG yang akan menghasilkan tegangan tiga fasa. Tegangan tiga fasa tersebut disearahkan menggunakan penyearah gelombang penuh tak terkontrol yang akan menghasilkan tegangan DC yang menjadi masukan konverter. Pengujian dilakukan dengan cara memvariasikan beban pada penyearah tiga fasa tak terkontrol untuk mendapatkan daya paling maksimal pada setiap kecepatan angin. Berikut merupakan hasil daya referensi.

Tabel 3.3 Daya Referensi Turbin Angin

Kecepatan angin (m/s)	Putaran rotor optimum (rpm)	Daya (Watt)
10	379,9	18.970
9	333,8	16.550
8	285,6	13.870

3.5 Kontrol MPPT Logika Fuzzy

MPPT pada penelitian ini menggunakan metode *fuzzy logic controller*. Teknik MPPT logika fuzzy pada turbin angin merupakan pengembangan dari *Hill Climbing Search* (HCS). Yang memiliki keunggulan dapat bekerja pada step variabel sehingga dapat meminimalisasi osilasi pada output. Logika fuzzy yang digunakan memiliki dua input yaitu *error* dan *delta error*, serta satu output berupa nilai *duty cycle* yang akan dihubungkan ke PWM. Dengan mevariasikan *duty cycle* pada konverter, maka akan memberikan beban yang akan mengubah kecepatan putaran rotor dari turbin angin.

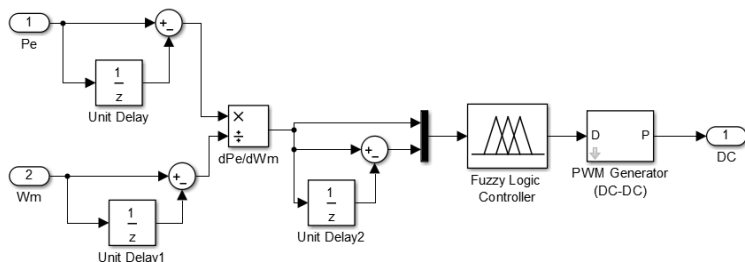
Eror adalah perubahan daya per perubahan putaran rotor tiap waktu. Sementara *delta error* merupakan perubahan eror tiap waktu.

$$e(t) = \frac{P_e(t) - P_e(t-1)}{\omega(t) - \omega(t-1)} \quad (3.1)$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \quad (3.2)$$

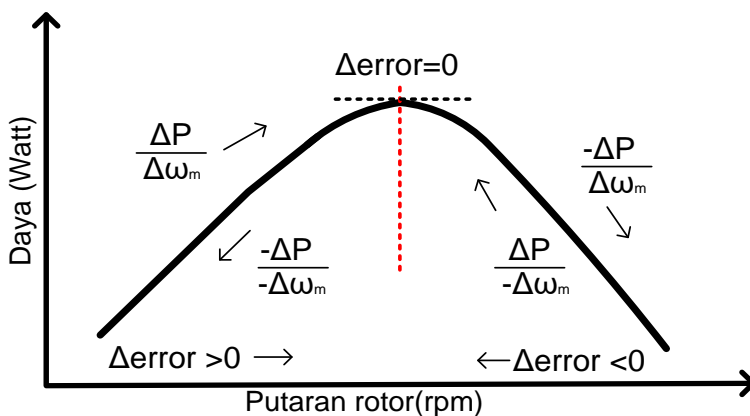
P_e dan ω merupakan daya listrik dari keluaran *rectifier* pada sistem turbin angin dengan PMSG dan putaran rotor pada tiap waktu sampling t [11].

Error $e(t)$ menunjukkan bahwa jika titik operasi berada pada waktu t berada di sebelah sisi kiri atau sisi kanan dari titik daya maksimum (MPP) pada kurva karakteristik $P-\omega$. Ketika error bernilai nol artinya menandakan bahwa kondisi operasi sudah berada pada kondisi MPP. Blok diagram kontrol MPPT fuzzy pada sistem turbin angin pada MATLAB/Simulink:



Gambar 3.4 Pemodelan Diagram Blok MPPT *Fuzzy Logic* pada Simulink

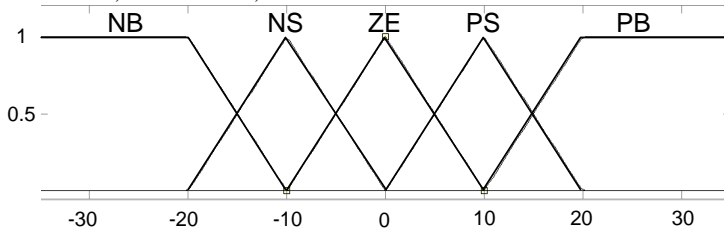
Desain kontrol logika fuzzy dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:



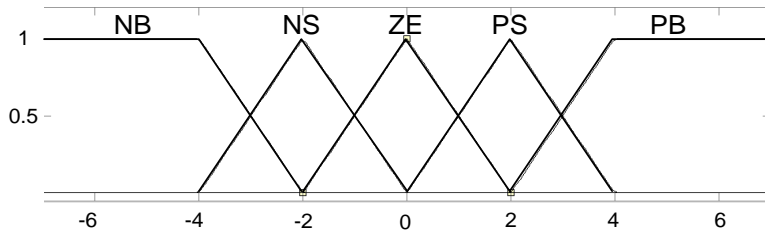
Gambar 3.5 Kriteria kontrol logika fuzzy untuk MPPT turbin angin

1. Fuzifikasi

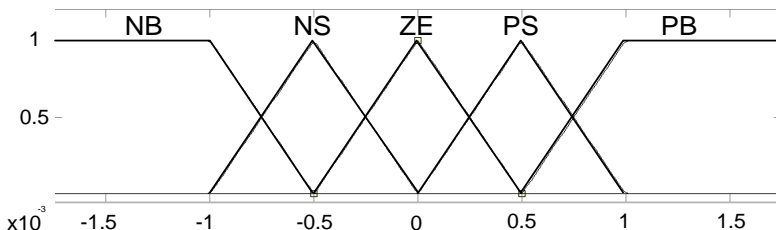
Proses fuzifikasi adalah mengubah nilai aktual input ke dalam pernyataan fuzzy pada *membership function*. Variabel yang digunakan untuk pernyataan fuzzy adalah NB (*Negative Big*), NS (*Negative Small*), PS (*Positive Small*), PB (*Positive Big*), dan ZE (*Zero Error*). *Membership function* untuk error dan delta error dapat dilihat pada Gambar 3.6, Gambar 3.7, Gambar 3.8



Gambar 3.6 *Membership Function* untuk error



Gambar 3.7 *Membership Function* untuk delta error



Gambar 3.8 *Membership Function* untuk duty cycle

2. Desain rule base

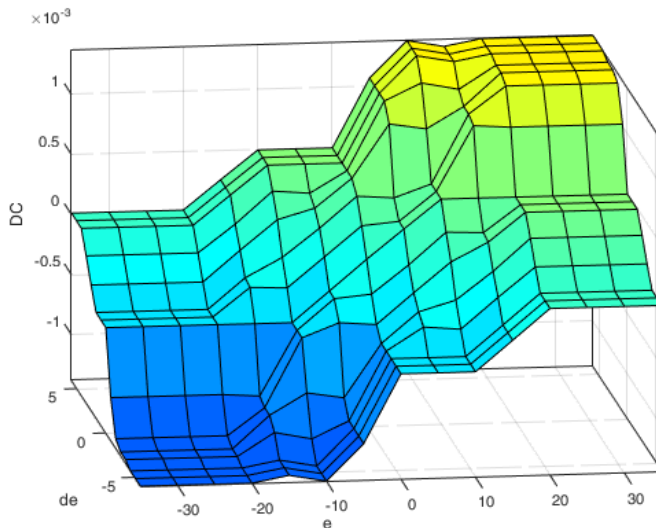
Rule base fuzzy bertujuan untuk menghimpun pernyataan implikasi *if-then* yang mengandung informasi untuk mengatur parameter yang

diinginkan. Rule algoritma fuzzy terdiri dari 25 pernyataan implikasi yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3.4 Rule base variabel e, de dan duty cycle pada MPPT Turbin Angin

de	NB	NS	ZE	PS	PB
e					
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

3. Defuzifikasi



Gambar 3.9 Surface logika fuzzy pada MPPT turbin angin

Setelah *rule base* ditentukan maka dilakukan proses evaluasi dari rule fuzzy tersebut untuk mendapatkan keluaran dari fuzzy. Pada hal ini keluaran fuzzy merupakan nilai dari *duty cycle*. Operasi fuzifikasi ini

akan mengkonversi pernyataan implikasi rule fuzzy menjadi suatu nilai pada output *duty cycle*. Nilai eror dan delta eror akan mempengaruhi besar *duty cycle* yang dihasilkan. Misal ketika eror pada kondisi PB dan delta eror pada kondisi ZE maka *duty cycle* adalah pada rentang nilai PS. Output fuzzy yang berupa *duty cycle* tersebut akan masuk ke komparator yang di komparasikan dengan sinyal segitiga sehingga menghasilkan gelombang pulsa. Dengan mengatur *duty cycle* pada konverter maka akan mempengaruhi putaran rotor generator untuk mencapai kecepatan optimal pada tiap kecepatan angin agar dapat menghasilkan daya maksimal.

3.6 Grid Side Inverter

3.6.1 Rangkaian Inverter Tiga Fasa

Rangkaian inverter tiga fasa terdiri dari enam buah saklar semikonduktor yang pada penelitian ini digunakan MOSFET. Inverter digunakan untuk mengonversi sumber DC menjadi sumber AC sehingga sistem dapat dihubungkan ke jaringan tiga fasa dengan cara mengatur penyaklaran dari saklar semikonduktor yang digunakan. Penyaklaran didapatkan dengan cara membandingkan tegangan tiga fasa referensi dengan gelombang segitiga pada frekuensi tertentu. Parameter inverter yang digunakan adalah:

- Frekuensi penyaklaran, $f_s = 10000\text{Hz}$
- Tegangan DC-link, $V_{dc} = 650\text{ V}$
- Modulasi frekuensi, $m_f = \frac{f_s}{f_1}$ (3.3)

$$m_f = \frac{10000\text{Hz}}{50\text{Hz}} = 200$$

- Modulasi amplitudo, $m_a = \frac{2.V_{LL}}{\sqrt{3}.V_{dc}}$ (3.4)

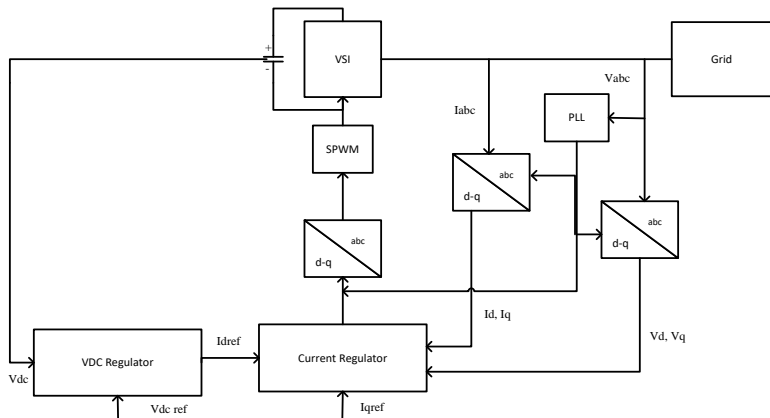
$$m_a = \frac{2.380}{\sqrt{3}.650} = 0.675$$

- Kapasitor DC-link, $C_{DC} = 600\text{ }\mu\text{F}$

3.6.2 Kontrol Inverter

Pengaturan penyaklaran inverter yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua buah kontrol *loop*, yaitu *outer loop* dan *inner loop*. Di mana *outer loop* adalah kontroler tegangan DC-Link dan *inner loop*

merupakan kontrol arus. Kontroler tegangan DC-Link digunakan agar nilai dari tegangan tetap konstan pada tegangan referensi DC-link. Sementara kontroler arus digunakan untuk mengatur besar arus yang akan disalurkan ke jaringan tiga fasa. Skema kontrol inverter terdiri dari *Phase Locked Loop* (PLL), *voltage regulator*, dan *current regulator*. Regulator tegangan menggunakan *Fuzzy Logic Controller* dan regulator arus menggunakan kontrol PI [9].



Gambar 3.10 Skema Kontrol Inverter

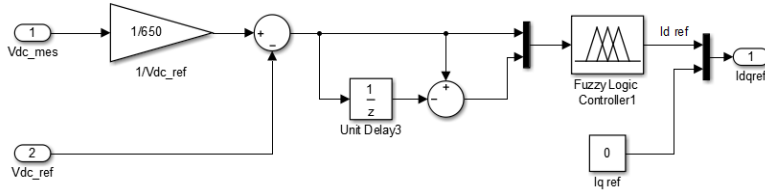
a) *Phase Locked Loop* (PLL)

PLL digunakan untuk mendeteksi frekuensi dan sudut fasa dari gelombang tegangan tiga fasa dari grid. Input PLL berupa tegangan tiga fasa dari jaringan dan output PLL kemudian digunakan untuk kalkulasi transformasi dari sumbu abc ke d-q.

b) Regulator Tegangan DC

Regulator tegangan digunakan untuk menjaga tegangan pada DC-link tetap sesuai nilai referensi yaitu 650 V. Prinsip dari regulator tegangan DC adalah dengan mengatur komponen arus aktif (I_d) yang akan disalurkan ke grid. Misal ketika tegangan DC-link terlalu rendah, maka arus I_d akan dikurangkan untuk menambah arus *charging* pada kapasitor DC-link agar tegangan kapasitor DC-link menjadi naik. Pada

penelitian ini digunakan *Fuzzy Logic Controller* untuk mengatur tegangan DC-link yang di inginkan.

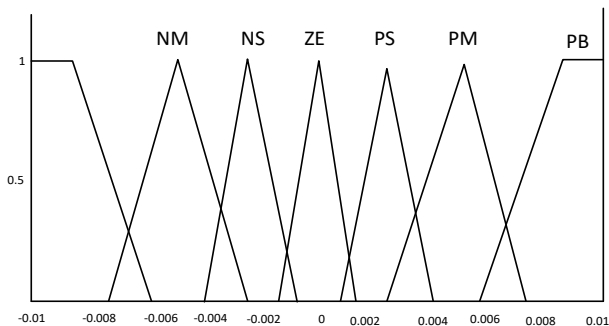


Gambar 3.11 Skema regulator tegangan DC pada Simulink

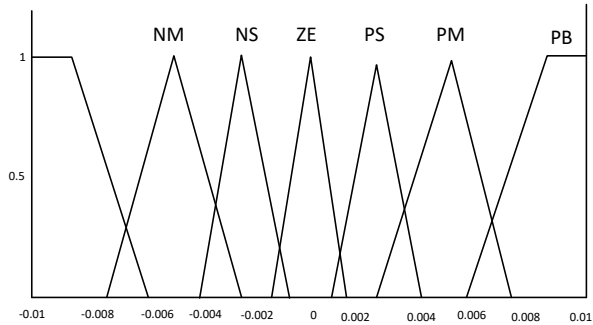
Seperti pada MPPT Fuzzy, diperlukan Fuzifikasi, desain *rule base*, serta defuzifikasi untuk menghasilkan keluaran fuzzy yang diinginkan.

1. Fuzifikasi

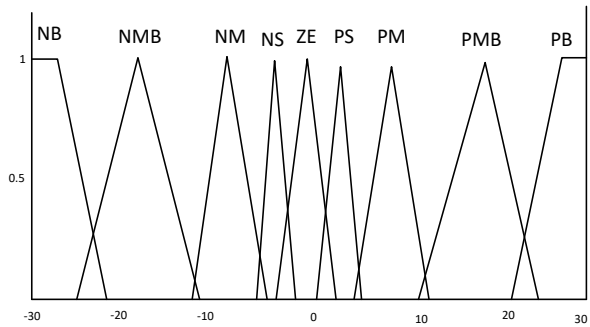
Proses fuzifikasi adalah mengubah nilai aktual input ke dalam pernyataan fuzzy pada *membership function*. Pada Vdc Regulator input yang digunakan adalah error dan delta error dari perbandingan Vdc dengan Vdc ref. Sementara keluarannya berupa nilai Idref. Variabel yang digunakan untuk pernyataan fuzzy adalah NB (*Negative Big*), NMB (*Negative Medium Big*), NS (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*), PMB (*Positive Medium Big*), PB (*Positive Big*), dan ZE (*Zero Error*). *Membership function* untuk error, delta error dan Id Ref dapat dilihat pada Gambar 3.12, 3.13 dan 3.14



Gambar 3.12 *Membership Function* untuk error



Gambar 3.13 *Membership Function* untuk delta eror



Gambar 3.14 *Membership Function* untuk Id ref

2. Desain *rule base*

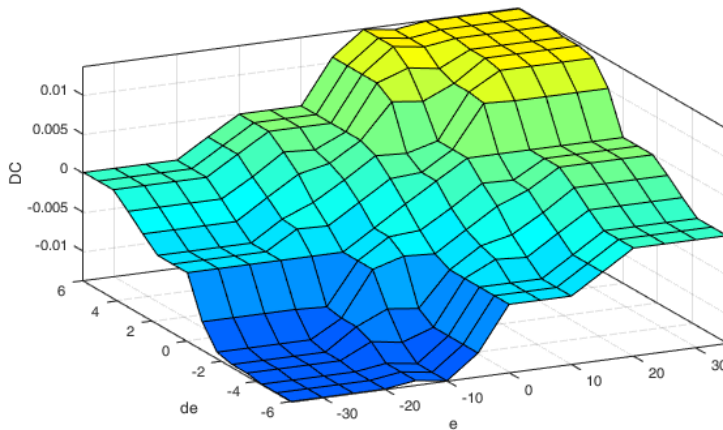
Rule base fuzzy bertujuan untuk menghimpun pernyataan implikasi *if-then* yang mengandung informasi untuk mengatur parameter yang diinginkan. Rule algoritma fuzzy terdiri dari 49 pernyataan implikasi yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3.5 *Rule base* variabel e, de dan Idref pada Kontrol Inverter

de		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB	NB	NMB	NM	NM	NS	NS	ZE
	NM	NMB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
	NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
	PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PMB
	PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PMB	PB

3. Defuzifikasi

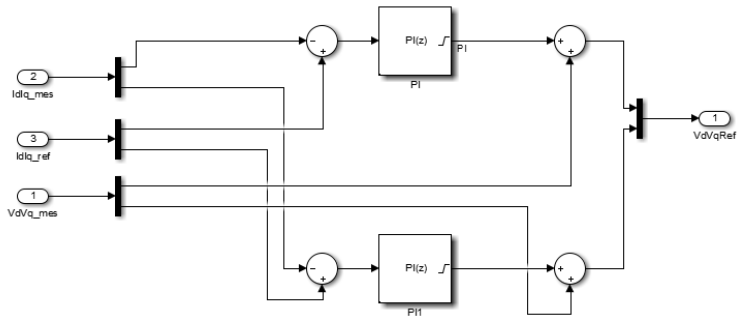
Setelah *rule base* ditentukan maka dilakukan proses evaluasi dari rule fuzzy tersebut untuk mendapatkan keluaran dari fuzzy. Pada kontrol inverter, keluaran fuzzy berupa nilai Idref. Operasi fuzifikasi ini akan mengkonversi pernyataan implikasi rule fuzzy menjadi suatu nilai pada output Idref. Nilai eror dan delta eror akan mempengaruhi besar Idref yang dihasilkan. Dengan mengatur Ide yang disalurkan jaringan tiga fasa, maka tegangan DC dapat di atur sesuai dengan nilai referensi. Misal ketika eror pada kondisi PB dan delta eror pada kondisi PB maka Idref adalah pada rentang nilai PB. Sehingga ketika nilai tegangan DC-link terlalu tinggi maka Id akan dinaikkan untuk mengurangi arus pada kapasitor DC-link.



Gambar 3.15 *Surface* kontrol inverter logika fuzzy

b) Regulator Arus

Regulator arus berguna untuk memperbaiki eror arus yang disuplai ke jaringan. Input pada regulator arus adalah tegangan grid yang telah dikonversi ke sumbu d-q, arus inverter pada sumbu d-q serta arus referensi pada sumbu d-q. Keluaran dari regulator arus akan menghasilkan tegangan referensi pada sumbu d-q yang akan ditransformasi balik ke sumbu a-b-c. Tegangan referensi tersebut akan dibandingkan dengan sinyal segitiga pada SPWM.



Gambar 3.16 Skema regulator arus pada Simulink

3.7 Desain Filter LCL

Berikut adalah nilai desain filter LCL dengan resistor peredam sebagai keluaran inverter:

Berdasarkan persamaan (2.26)

$$L_i = \frac{V_{dc}}{16f_s \Delta I_{max}}$$

Dengan nilai V_{dc} sebesar 650 Volt, ΔI_{max} 7,4432 A, f_s 10kHz maka didapatkan nilai $L_i = 0,5458$ mH.

Berdasarkan persamaan (2.28) nilai L_g didapatkan:

$$L_g = rxL_i$$

Dengan nilai r adalah 0,6 maka didapatkan nilai $L_g = 0,3274$ mH.

Untuk nilai kapasitor perlu diperhatikan bahwa kondisi variasi faktor daya maksimal adalah ditentukan sebesar 5%. Berdasarkan persamaan (2.29) didapatkan nilai C_f

$$C_f = 0,05 \frac{1}{2\pi f_N Z_{base}}$$

Dengan nilai f_N sebesar 50 Hz, Z_{base} sebesar 7,22. Maka didapatkan $C_f = 22 \text{ uF}$

Untuk mengurangi osilasi pada filter maka dibutuhkan resistor peredam yang dipasang seri terhadap kapasitor. Persamaan resistor peredam berdasarkan persamaan (2.30)

$$R_{sd} = \frac{1}{3 \times 2\pi f_{res} \times C_f}$$

Dengan nilai f_{res} 2.3 kHz, maka didapatkan R_{sd} 1,0157 ohm.

BAB 4

HASIL SIMULASI SISTEM TURBIN ANGIN TERHUBUNG JARINGAN

Bab ini membahas simulasi beserta analisa data dari sistem turbin angin terhubung jaringan tiga fasa dengan MPPT dan kontrol inverter *Fuzzy Logic Control*. Terdapat tiga pengujian yang dilakukan yaitu:

1. Pengujian MPPT pada turbin angin dengan variasi kecepatan angin 8 m/s, 9 m/s dan 10 m/s.
2. Pengujian sistem turbin angin terhubung jaringan dengan variasi kecepatan angin 8 m/s, 9 m/s dan 10 m/s.
3. Pengujian sistem turbin angin pada kecepatan yang berubah-ubah.

Pengujian dilakukan menggunakan MATLAB 2015a/Simulink dengan time step diskrit 0,6 μ s

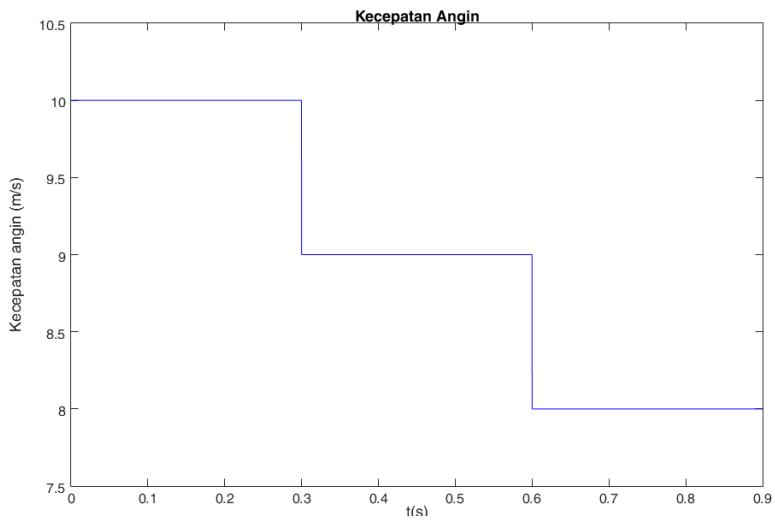
4.1 Pengujian Sistem Turbin Angin dengan Kecepatan Angin Bervariasi

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan MPPT Logika Fuzzy dalam melakukan *tracking* daya maksimum pada kecepatan angin yang bervariasi. Kecepatan angin yang diberikan adalah 10 m/s, 9 m/s, 8 m/s. Kurva perubahan kecepatan angin ditunjukkan pada Gambar 4.1.

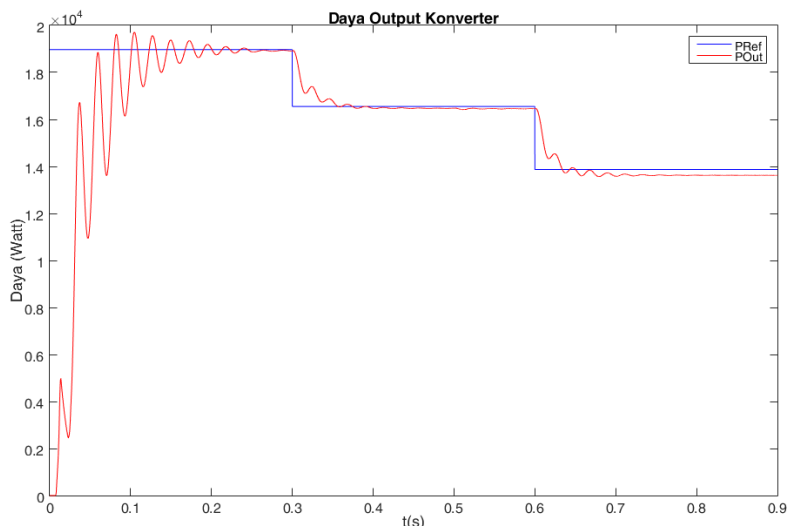
Pengujian dilakukan dengan beban DC resistif sesuai dengan kapasitas daya yang dapat dibangkitkan dari turbin angin. Nilai beban resistif didapatkan berdasarkan persamaan:

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (4.1)$$

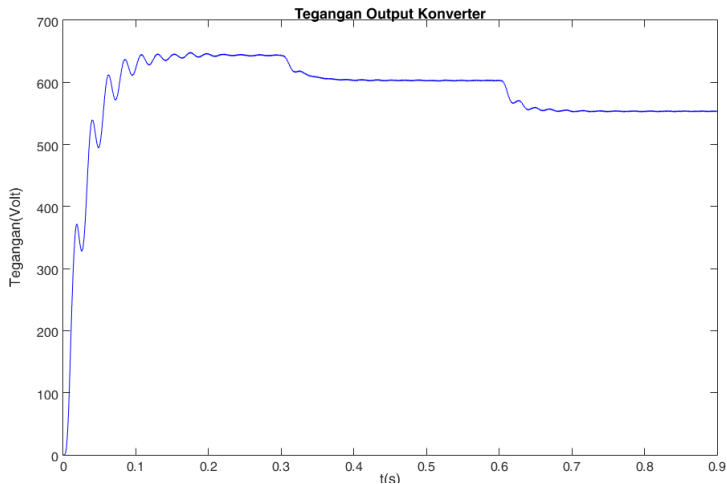
Dengan nilai tegangan output DC sebesar 650 Volt dan daya maksimum sebesar 18965 Watt, didapatkan beban resistif sebesar 22,27 Ω .



Gambar 4.1 Kurva Kecepatan Angin



Gambar 4.2 Kurva daya aktual dan daya referensi pada boost converter



Gambar 4.3 Tegangan Output Boost Converter

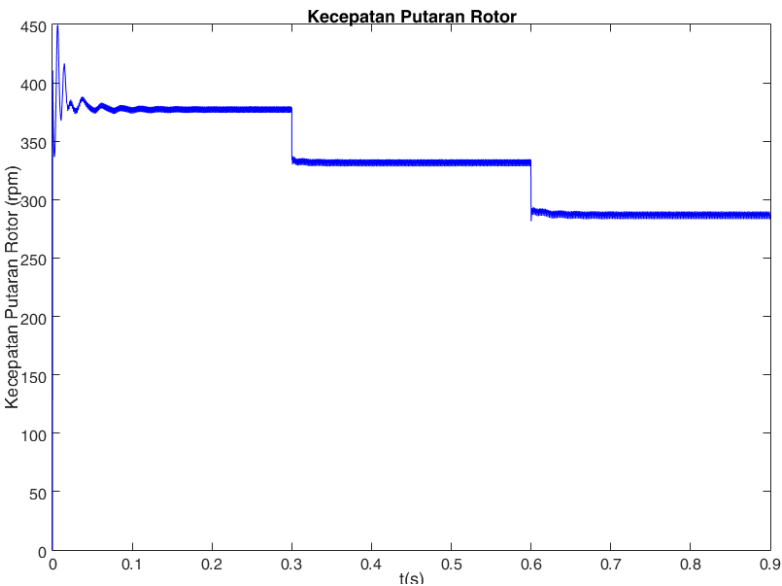
Tabel 4.1 Daya output aktual Turbin Angin dengan daya referensi pada kecepatan angin berbeda

Kecepatan Angin (m/s)	Daya referensi (Watt)	Daya aktual (Watt)	Eror (%)
10	18.970	18.910	0,316
9	16.550	16.450	0,604
8	13.870	13.620	1,802

Dari gambar 4.2 dan tabel 4.1 terlihat bahwa kontrol MPPT pada turbin angin dengan menggunakan Logika Fuzzy sudah dapat bekerja untuk mendapatkan daya maksimum pada setiap perubahan kecepatan angin. Pada tabel 4.1, terdapat eror daya aktual yang dihasilkan terhadap daya referensi. Pada kecepatan angin 10 m/s memiliki nilai eror terkecil yaitu 0,316%. Sementara eror terbesar pada kecepatan angin 8 m/s yaitu sebesar 1,802%. Sementara gambar 4.3 menunjukkan bahwa tegangan output konverter pada kecepatan angin 10 m/s sebesar 650 Volt sesuai desain konverter yang dibuat.

Sesuai dengan kurva karakteristik kecepatan turbin terhadap daya turbin angin. Setiap kecepatan angin mempunyai kecepatan putaran

turbin optimal yang dapat menghasilkan daya maksimum. Berikut adalah data putaran PMSG:



Gambar 4.4 Kecepatan rotasi rotor turbin angin pada kecepatan angin berbeda

Tabel 4.2 Putaran referensi dan putaran aktual turbin angin pada kecepatan angin berubah

Kecepatan Angin (m/s)	Putaran turbin referensi (rpm)	Putaran turbin aktual (rpm)	Eror (%)
10	377,4	379,8	0,635
9	334,2	330,9	0,987
8	286,7	284,5	0,767

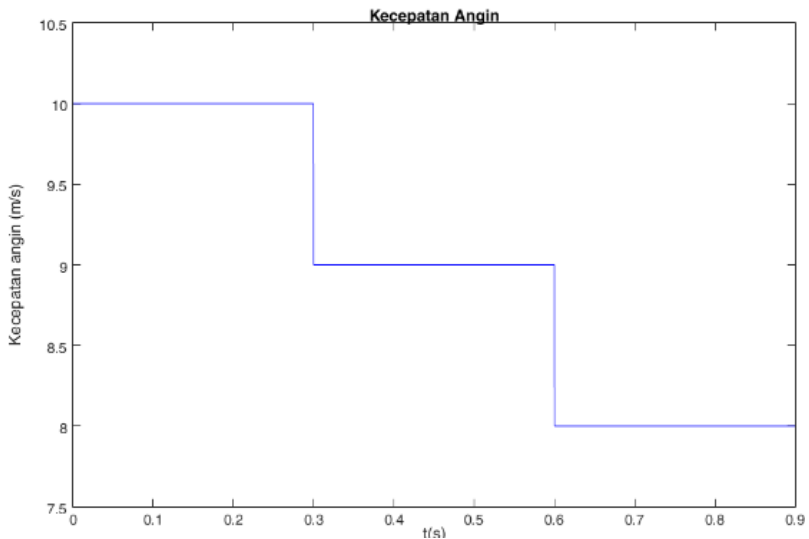
Dari gambar 4.4 , putaran rotor turbin akan berubah mengikuti perubahan kecepatan angin. Tabel 4.2 menunjukkan bahwa kecepatan putaran rotor akan mengikuti kecepatan putaran referensi. Terdapat eror

antara putaran aktual dengan putaran referensi. Error terkecil pada kecepatan angin 10 m/s yaitu 0,635%, sementara error terbesar pada kecepatan angin 9 m/s yaitu 0,767%.

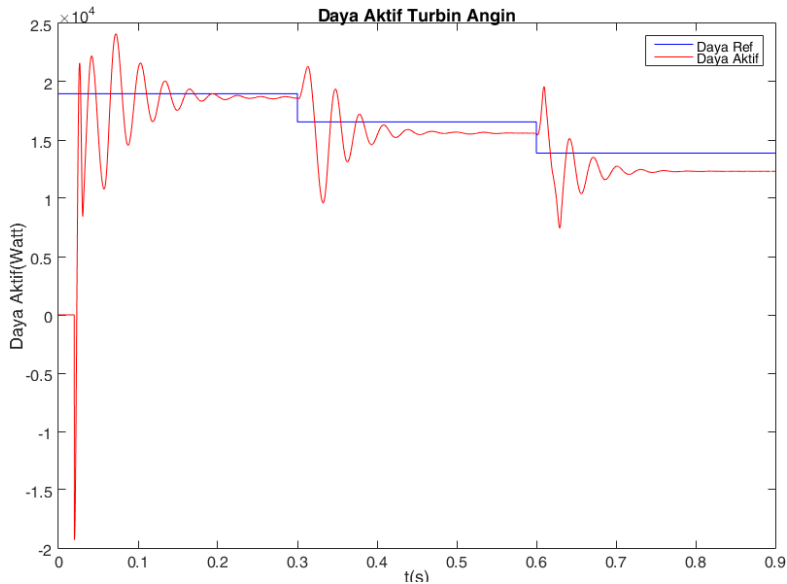
Besar error bergantung pada kinerja kontrol MPPT pada turbin angin, semakin kecil error yang dihasilkan maka *tracking* daya dengan menggunakan kontrol logika fuzzy semakin baik. Berdasarkan data error daya dan error putaran turbin terhadap nilai referensinya, didapatkan hasil error dibawah 1%, maka daya yang dihasilkan sudah optimal.

4.2 Pengujian Sistem Turbin Angin Terhubung Jaringan dengan Kecepatan Angin Bervariasi

Pada pengujian ini dilakukan simulasi sistem turbin angin dengan integrasi jaringan tiga fasa. Beban pada jaringan adalah sebesar 15000 Watt dan 800 VAR. Digunakan kecepatan angin bervariasi sesuai dengan gambar 4.5. Kecepatan angin yang diberikan adalah 10 m/s, 9 m/s, 8 m/s.



Gambar 4.5 Variasi kecepatan angin



Gambar 4.6 Daya aktif output turbin angin

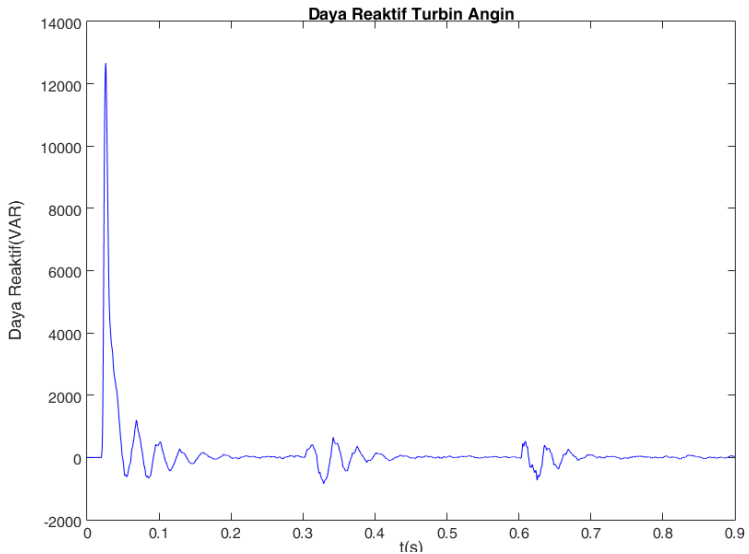
Dari gambar 4.6 terlihat bahwa kontrol MPPT sudah bekerja baik ketika terhubung dengan jaringan tiga fasa karena daya yang dihasilkan sistem turbin angin sudah dapat mengikuti daya referensinya.

Tabel 4.3 Daya output aktual Turbin Angin dengan daya referensi pada kecepatan angin berbeda saat terhubung grid

Kecepatan Angin (m/s)	Daya referensi (Watt)	Daya aktual (Watt)
10	18.970	18.710
9	16.550	15.590
8	13.870	12.310

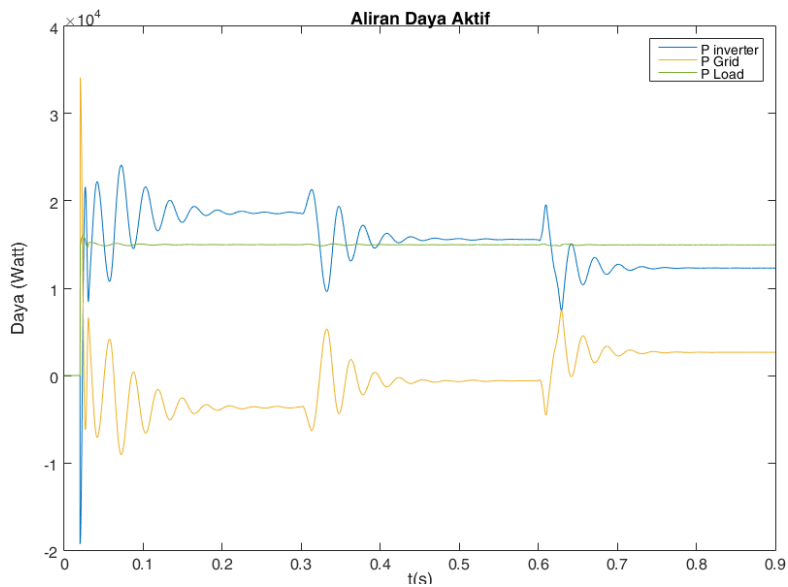
Berdasarkan hasil pengujian, sistem turbin angin dengan kontrol MPPT Logika Fuzzy sudah dapat menyalurkan daya ke jaringan dengan baik. Terdapat penurunan daya pada sistem karena terdapat adanya parameter resistansi (R) pada inverter tiga fasa yang menyebabkan adanya rugi-rugi penyaklaran. Daya yang disalurkan ke jaringan bergantung pada

besarnya kecepatan angin yang memutar turbin angin. Semakin besar kecepatan angin maka semakin besar daya aktif yang disalurkan ke jaringan, semakin kecil kecepatan angin maka semakin kecil pula daya aktif yang disalurkan ke jaringan. Sistem tidak menyalurkan daya reaktif, karena pada kontrol inverter I_{qref} diatur pada nilai 0. Berdasarkan gambar 4.7 daya reaktif yang dihasilkan selalu dipertahankan pada nilai 0. Maka kontrol inverter sudah dapat bekerja dengan baik.

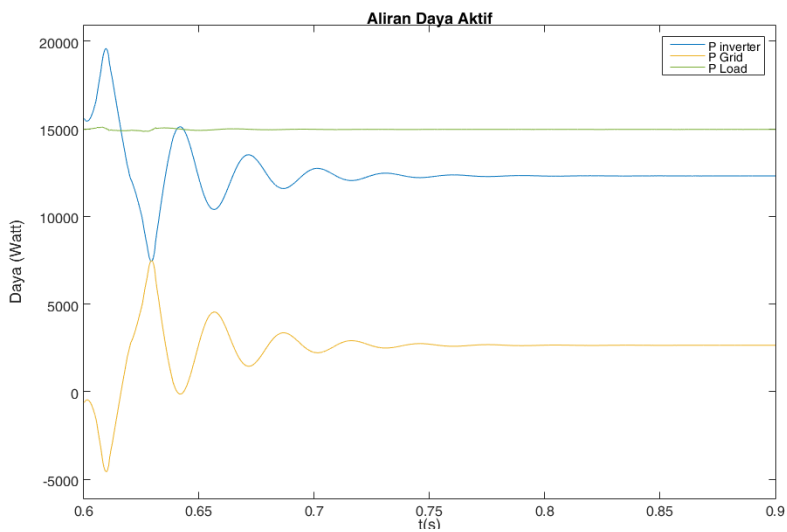


Gambar 4.7 Daya reaktif output turbin angin

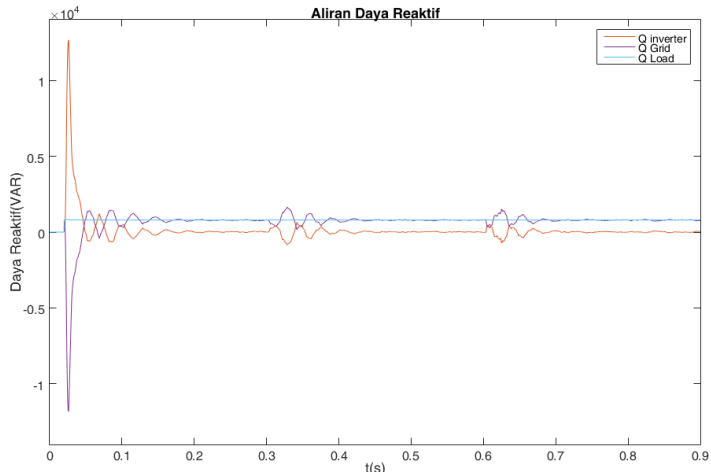
Besar daya aktif jaringan ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada gambar 4.8, mulai $t = 0s$ hingga $t = 0,6s$ daya aktif jaringan bernilai negatif, menunjukkan bahwa daya yang dibutuhkan oleh beban sebesar 15000 Watt sudah dapat disuplai oleh daya keluaran dari turbin angin. Kemudian mulai $t = 0,6s$ hingga $t = 0,9s$, daya keluaran turbin angin hanya bernilai 13.360 Watt saja, sehingga jaringan menyuplai daya aktif sebesar 1640 Watt untuk memenuhi kebutuhan beban sebesar 15000 Watt



Gambar 4.8 Aliran Daya Aktif



Gambar 4.9 Aliran Daya Aktif $t = 0,6s - 0,9s$

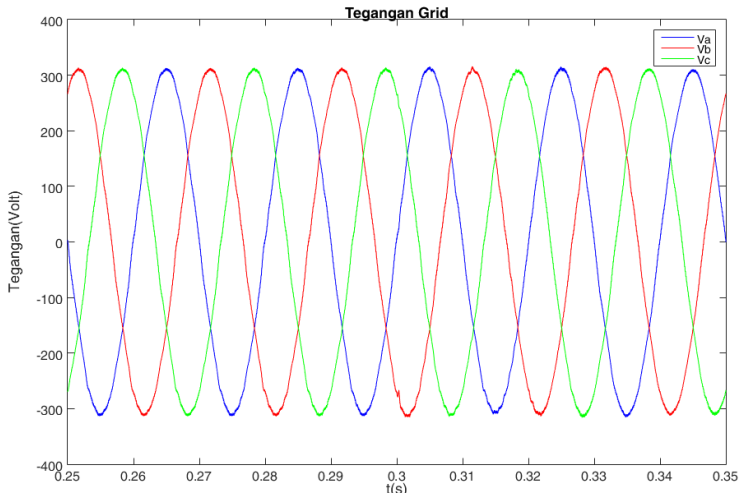


Gambar 4.10 Daya aktif dan reaktif jaringan

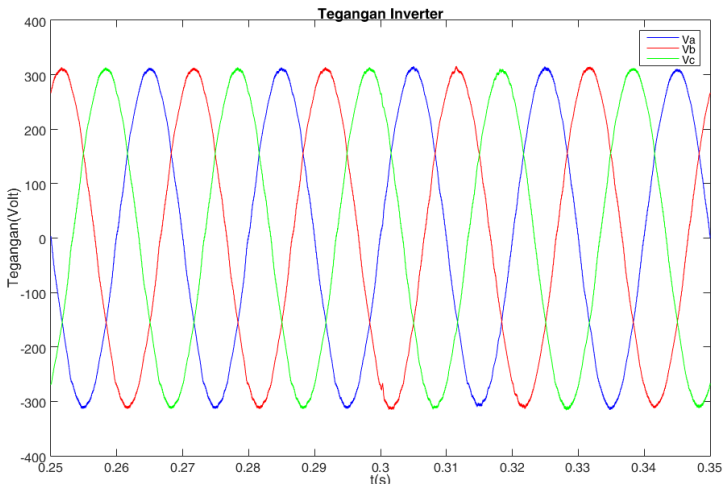
Sistem turbin angin pada penelitian ini daya reaktif di suplai dari jaringan. Pada gambar 4.10 menunjukkan bahwa sistem turbin angin diatur untuk tidak menyuplai daya reaktif sehingga selalu bernilai 0 VAR, maka jaringan selalu menyuplai daya reaktif sebesar kebutuhan beban yaitu 800 VAR.

Pada sistem terhubung jaringan maka tegangan sistem harus memiliki amplitudo yang sama dengan amplitudo dari jaringan tiga fasa. Untuk membuktikan bahwa tegangan inverter selalu memiliki nilai yang sama dengan tegangan grid, dan nilai arus selalu berubah-ubah bergantung terhadap kecepatan angin, maka dapat diperhatikan pada gelombang tiga fasa ketika terjadi perubahan kecepatan angin.

Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan tegangan grid dan tegangan inverter saat terjadi perubahan kecepatan angin dari 10 m/s ke 9 m/s. Untuk tegangan output dari inverter selalu konstan dengan tegangan dari jaringan. Sementara untuk arus output inverter akan terjadi perubahan bergantung pada kecepatan angin.

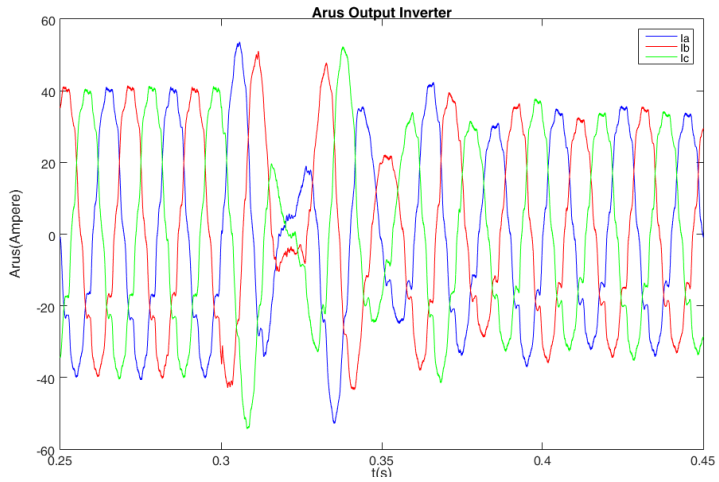


Gambar 4.11 Tegangan Grid

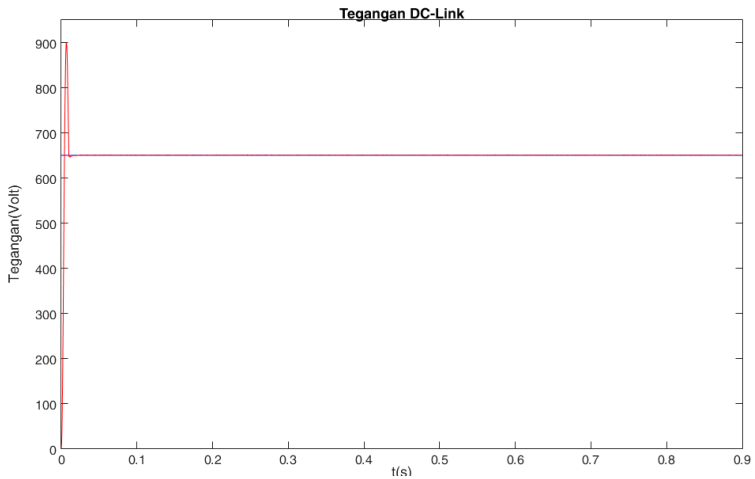


Gambar 4.12 Tegangan Output Inverter $t = 0,2s - 0,4s$

Gambar 4.13 menunjukkan ketika terjadi perubahan kecepatan angin dari 10 m/s ke 9 m/s pada $t=0,3$ sekon, maka akan terjadi penurunan nilai amplitudo arus tiga fasa output inverter. Sementara untuk nilai tegangan output inverter tetap konstan mengikuti nilai tegangan jaringan.



Gambar 4.13 Arus Output Inverter $t = 0,4\text{s} - 0,6\text{s}$

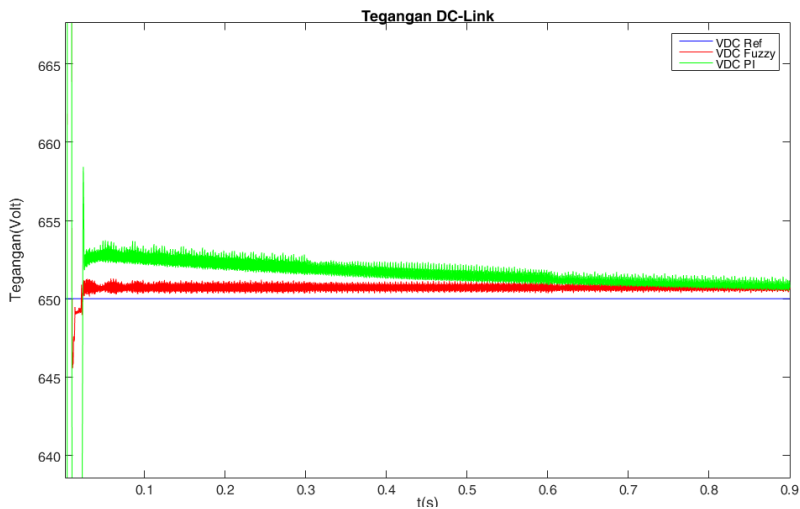


Gambar 4.14 Tegangan DC-link

Gambar 4.14 menunjukkan bahwa tegangan DC-link pada inverter tetap terjaga konstan sebesar 650 Volt walaupun terjadi

perubahan kecepatan angin. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol inverter pada bagian Vdc Regulator dengan menggunakan Logika Fuzzy sudah dapat bekerja dengan baik.

Prinsip dari regulator tegangan DC adalah dengan mengatur komponen arus aktif (I_d) yang akan disalurkan ke grid. Misal ketika tegangan DC-link terlalu rendah, maka arus I_d yang disuplai ke grid akan dikurangi untuk menambah arus *charging* pada kapasitor DC-link agar tegangan kapasitor DC-link menjadi naik. Sementara ketika tegangan DC-link terlalu besar, maka regulator tegangan DC akan memberikan lebih banyak arus untuk disalurkan ke grid, pada saat hal ini terjadi *dicharge* pada kapasitor DC-link.



Gambar 4.15 VDC-link dengan Logika Fuzzy dan Kontrol PI

Gambar 4.15 menunjukkan hasil simulasi sistem turbin angin pada bagian kontrol inverter ketika menggunakan kontrol logika fuzzy dan kontrol PI. Tegangan DC-link dengan menggunakan kontrol PI terdapat adanya overshoot yang berlebih serta fluktuasi tegangan yang lebih besar selama 0.6 detik sebelum mendekati nilai referensi pada 650 Volt. Sementara tegangan DC-link dengan menggunakan kontrol logika fuzzy tidak terdapat adanya fluktuasi tegangan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi sistem dan analisa data pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Penggunaan kontrol logika fuzzy sebagai MPPT mempunyai efektivitas tinggi dengan eror daya paling besar 1,8% dan paling kecil 0,31%.
2. Terjadi penurunan daya dari keluaran konverter setelah terhubung ke jaringan tiga fasa dari daya keluaran konverter karena terdapat parameter resistansi pada inverter tiga fasa.
3. Penggunaan kontrol logika fuzzy pada regulator tegangan DC dapat bekerja lebih baik dibanding dengan kontrol PI. Karena dapat mencapai tegangan referensi dengan cepat tanpa adanya fluktuasi dan osilasi yang lama.
4. Jaringan tiga fasa akan mulai menyuplai daya aktif ketika daya dari sistem turbin angin tidak mencukupi kebutuhan beban.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah:

1. Penggunaan konverter boost pada sistem turbin angin dapat diganti dengan konverter step-up lain untuk mendapatkan efisiensi yang lebih baik.
2. Untuk mendapatkan penelusuran daya maksimum yang lebih baik, kontrol logika fuzzy dapat dikombinasikan dengan kontroler PI.
3. Agar mendapatkan performa yang lebih baik, dapat digunakan PI-Fuzzy pada regulator tegangan DC serta regulator arus pada kontrol inverter.

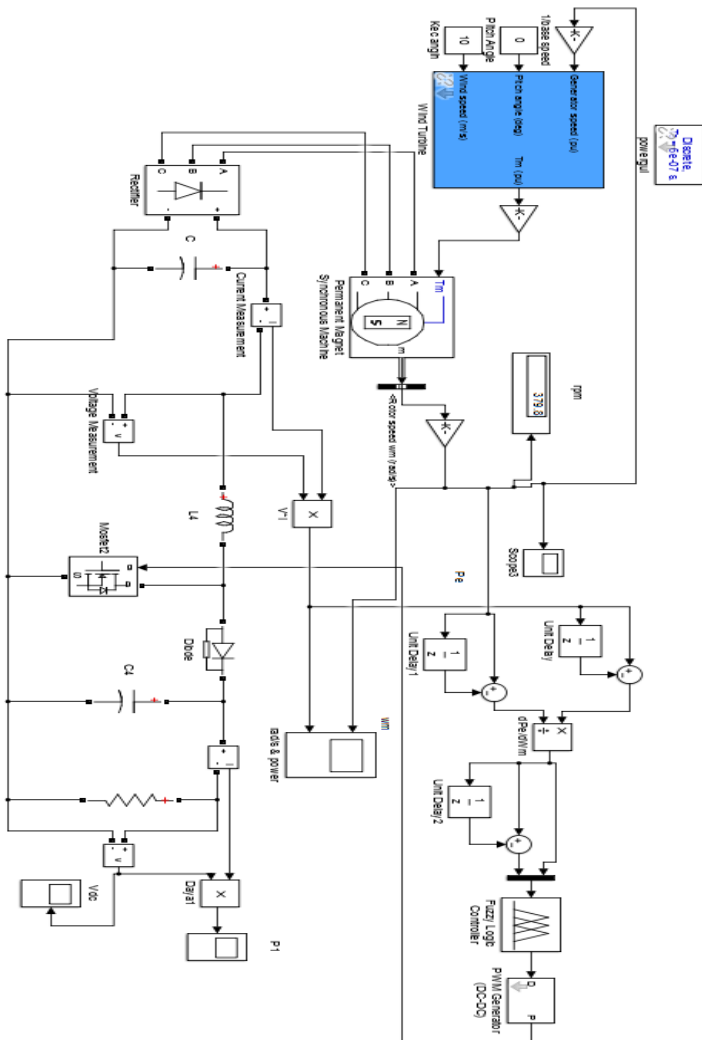
Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

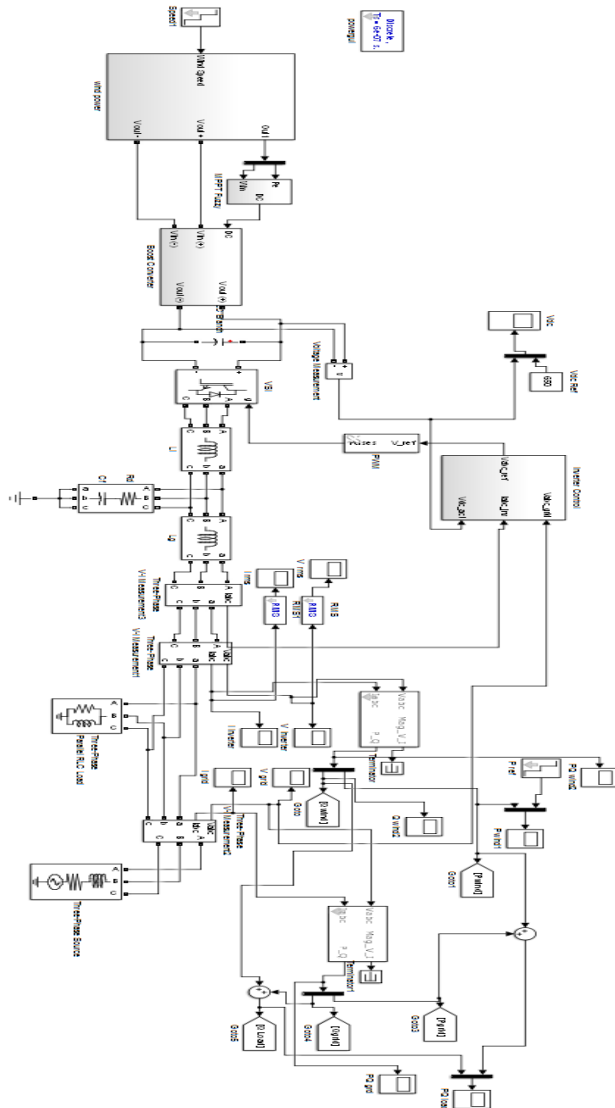
- [1] S. M. Muyeen, Ahmed Al-Durra, "Modeling and Control Strategies of Fuzzy Logic Controlled Inverter System for Grid Interconnected Variable Speed Wind Generator," *IEEE Systems Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 817-824, 2013.
- [2] Kelvin Tan, Syed Islam, "Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 19, no. 2, pp. 392-399, 2004.
- [3] E. W. E. Association, WIND ENERGY - THE FACTS, USA: Earthscan, 2009, p. 31.
- [4] J.F. MANWELL ; J.G MCGOWAN; A.L. ROGERS, WIND ENERGY EXPLAINED THEORY, DESIGN AND APPLICATION, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [5] D. Zhou dan T. Franke, "Comparison of Wind Power Converter Reliability With Low-Speed and Medium-Speed Permanent-Magnet Synchronous Generators," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 62, no. 10, 2015.
- [6] D. W. Hart, Power Electronis, New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2011.
- [7] T. J. Ross, Fuzzy Logic with Engineering Applications, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [8] P. Muhammad H. Rashid, POWER ELECTRONICS HANDBOOK DEVICES, CIRCUITS, AND APPLICATIONS, USA: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [9] J. Zhang dan S. Xu, Application of Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Wind Energy Conversion System, InTech, 2015.

- [10] K. A. E. W. Hamza, H. Linda dan L. Cherif, "LCL filter design with passive damping for photovoltaic grid connected systems," dalam *Renewable Energy Congress (IREC), 2015 6th International*, Sousse, Tunisia, 2015.
- [11] A. M. El-Sebaai, M. S. Hamad dan A. A. Helal, "A sensorless MPPT technique for a grid-connected PMSG wind turbine system," dalam *Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), 2nd IET*, 2013.
- [12] M. Rosyadi, S. Mueeen, R. Takahashi dan J. Tamura, "Transient Stability Enhancement of Variable Speed Permanent Magnet Wind Generator using Adaptive PI-Fuzzy Controller," dalam *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, 2011.
- [13] M. Mohr dan F. Fuchs, "Comparison of three phase current source inverters and voltage source inverters linked with DC to DC boost converters for fuel cell generation systems," dalam *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005.
- [14] T. A. Hadi, *Desain dan Simulasi Integrasi Sistem Pembangkit Hibrida PV-Wind Menggunakan Konverter High Gain Integrated Cascade Boost (HGICB) Terhubung Jaringan*, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.
- [15] Hany M. Hasanien, S. M. Mueeen, "Design Optimization of Controller Parameters Used in Variable Speed Wind Energy Conversion System by Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 200-208, 2012.
- [16] A. M. Yousef, G. El-Saady dan F. K. Abu-Elyouser, "Fuzzy logic controller for a photovoltaic array system to AC grid connected," dalam *Smart Grid (SASG), 2016 Saudi Arabia*, Saudi Arabia, 2016.

LAMPIRAN



Gambar Rangkaian Pengujian MPPT dengan beban DC konstan



Gambar Rangkaian Turbin Angin Terhubung Grid

BIOGRAFI PENULIS



Penulis buku Tugas Akhir dengan judul “**Desain dan Simulasi Kontrol Generator Side Converter dan Grid Side Inverter Terhubung Jala-Jala Dengan Kontrol Logika Fuzzy untuk Variable Speed Wind Turbine**” bernama lengkap Bayu Indra Setyanto. Penulis biasa dipanggil Bayu. Lahir di Purworejo, 7 Juni 1995. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Kliwonan pada tahun 2007, melanjutkan ke SMPN 2 Purworejo hingga lulus tahun 2010 dan setelah itu melanjutkan ke SMAN 1 Purworejo hingga lulus tahun 2013. Penulis kemudian melanjutkan studi di Teknik Elektro ITS. Selama masa perkuliahan, penulis aktif di organisasi HIMATEKTRO ITS selama dua periode di Departemen Komunikas dan Informasi. Pada tahun keempat penulis juga aktif menjadi asisten di Laboratorium Konversi Energi Listrik ITS. Penulis dapat dihubungi melalui email: bayuindras22@gmail.com dan bayu13@mhs.ee.its.ac.id

Halaman ini sengaja dikosongkan